



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : énergétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Adel Chair

Le : [Click here to enter a date.](#)

Etude des performances thermiques d'un capteur solaire à air : utilisation de différents matériaux composites à base de déchets de palmier dattier

Jury :

| | | | | |
|-----|----------------------|----|----------------------|------------|
| Mr. | Adel Benchabane | Pr | Université de Biskra | Président |
| Mr. | Adnane Labeled | Pr | Université de Biskra | Rapporteur |
| Mr. | Abd Alghani Lakroune | Dr | Université de Biskra | Examineur |

Remerciements :

Merci et reconnaissance tout d'abord à dieu qui nous a donné la force Pour terminer ce modeste travail.

Toutes nos infinies gratitudees à notre promoteur monsieur Dr. Adnane LABED

Pour son encadrement et ses aides précieuses.

Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département : Génie mécanique.

Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudees et respects.

Résumé :

Les palmiers dattier produisent chaque année de grandes quantités de déchets inexploités, et au lieu de s'en débarrasser, ils peuvent jouer un rôle dans l'économie nationale tel que l'industrie du bois, la biomasse, le composte et l'isolation thermique. C'est dans ce contexte que nous allons s'intéresser dans ce travail numérique à l'étude des performances thermiques d'un capteur solaire utilisant différents matériaux comme isolant dans la partie arrière du capteur. Parmi ces matériaux nous avons utilisé un panneau sandwich constitué du pétiole du palmier dattier. Les résultats de l'étude ont montré que le panneau sandwich composé du papier recyclé comme cœur présente le meilleur isolant et par conséquent les meilleures performances du capteur solaire. Malgré que le panneau composé du pétiole comme cœur ne présente pas la meilleur résistivité thermique mais les performances du capteur utilisant ce matériau sont très suffisantes pour différentes applications telle que le séchage des produits agro-alimentaire.

Abstract :

Date palms produce large amounts of untapped waste every year, and instead of getting rid of it, they can play a role in the national economy such as the timber industry, biomass, compost and thermal insulation. It is in this context that we will be interested in this digital work in the study of the thermal performance of a solar collector using different materials as insulation in the rear part of the collector. Among these materials we used a sandwich panel made from the petiole of the date palm. The results of the study showed that the sandwich panel made from recycled paper as the core has the best insulation and therefore the best performance of the solar collector. Although the panel composed of the petiole as the heart does not have the best thermal resistivity, but the performance of the sensor using this material is very sufficient for different applications such as the drying of food products.

ملخص :

تنتج أشجار النخيل كميات كبيرة من البقايا غير المستغلة، وبدلاً من التخلص منها، يمكن أن تلعب دوراً في الاقتصاد الوطني كصناعة الخشب، العلف، المادة الحية والعازل الحراري. في هذا السياق، سنهتم في هذا العمل الرقمي بدراسة الأداء الحراري لملتقط شمسي باستخدام مواد مختلفة كعازل في الجزء الخلفي من المجمع. من بين هذه المواد استخدمنا شظيرة مصنوعة من سويقات جريد نخيل التمر. أظهرت نتائج الدراسة أن اللوح العازل المصنوع من الورق المعاد تدويره حيث كجزء داخلي (القلب) لديه أفضل عزل وبالتالي أفضل أداء لمجمع الطاقة الشمسية. على الرغم من أن اللوحة المكونة من الجريد كقلب لا تتمتع بأفضل مقاومة حرارية، إلا أن أداء الملتقط باستخدام هذه المادة كافٍ جداً للتطبيقات المختلفة مثل تجفيف المنتجات الغذائية الزراعية.

Introduction générale :

Les capteurs solaires représentent un moyen important de convertir l'énergie solaire en énergie thermique, et il était donc nécessaire d'étudier l'amélioration de ses performances thermiques. L'amélioration des performances thermiques des capteurs solaires plats dépend de plusieurs techniques, et nous mentionnons ici en particulier l'amélioration des capteurs en réduisant les pertes de chaleur à l'arrière du capteur. Plus précisément l'isolant thermique, qui joue un rôle important dans le maintien de la chaleur de le fluide thermique et donc plus de performances thermiques du capteur solaire.

Dans ce travail, une étude a été menée sur le capteur solaire plat et ses performances ont été améliorées en développant l'isolation thermique pour devenir plus efficace. Ce travail vise à trouver le meilleur isolant dans la composition des matériaux composites par prise en sandwich.

Dans le premier chapitre, des généralités sur l'énergie thermique et solaire et une description du capteur solaire plat En mentionnant les types d'isolants thermiques

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à la nature des matériaux composites, à leurs propriétés thermiques et à leurs avantages.

Dans le troisième chapitre, une étude théorique de la conductivité thermique et la modélisation des coefficients d'échange thermique

Quatrième chapitre Etude thermique de l'évolution Résistance thermique des sandwichs

Nomenclature :

| Symbole | Dénomination |
|-----------------|---|
| S | Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2). |
| λ | La conductivité thermique ($W/m \text{ } ^\circ C$). |
| λ_{is} | conductivités thermiques de l'isolant ($w/m.k$) |
| λ_b | conductivités thermiques de bois ($w/m.k$) |
| x | Variable d'espace dans la direction du flux (m). |
| Q_{cd} | Le flux de chaleur par conduction (W). |
| Q_{cv} | Le flux de chaleur par convection (W). |
| T_p | La température de surface de solide ($^\circ C$). |
| T_∞ | La température du fluide avant son contact avec le solide ($^\circ C$). |
| T_{fe} | Température d'entrée ($^\circ C$). |
| T_{fs} | Température de sortie ($^\circ C$). |
| h_c | Le coefficient de transmission thermique par convection ($W/m^2 k$) |
| U_m | vitesse moyenne du fluide (m/s) |
| ρ | Masse volumique du fluide (Kg/m^3) |
| C_p | chaleur spécifique du fluide ($j/kg. K$) |
| μ | viscosité thermique du fluide (m^2/s) |
| D | dimension caractéristique de la surface d'échange (m) |
| Re | le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide |
| Pr | le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi. |
| Nu | le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi. |
| Q_r | Densité de flux de chaleur émis par le corps. W/m^2 |
| Q_{cv} | Le flux de chaleur par convection (W). |
| ε | Émissivité thermique du matériau. |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^{-2}k^{-2}$) |
| G | le flux global (W). |
| Q_u | L'énergie utile (W). |
| Q_s | L'énergie stockée (W). |
| Q_p | Déperditions thermiques (W). |
| σ_T | L'amplitude volumique |
| ε_i | l'émissivité du milieu i (de surface S_i), |
| F_{12} | le facteur de forme géométrique |
| v_v | la vitesse du vent en (m/s). |
| T_{fm} | Temperature moyen du fluide ($^\circ C$). |
| D_h | le diamètre hydraulique (m) |
| N | le nombre de vitrages |
| F | le facteur correctif tenant compte de l'effet du vent |
| C | le facteur tenant compte de l'inclinaison de l'insolateur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles |

CHAPITRE I

Etude

Bibliographique

Sommaire :

| | |
|---|----|
| I. Introduction | 1 |
| I.1 l'énergie solaire | 5 |
| I.2 Energie solaire thermique | 6 |
| I.3 Façons d'en bénéficier rayonnement solaire | 6 |
| I.4 catégories de capteurs solaires | 7 |
| I.5 Différents types des capteurs solaires thermiques | 7 |
| I.5.1 Capteurs solaires plans | 7 |
| I.5.2 Capteurs plans non vitrés | 7 |
| I.5.3 Capteurs plans vitrés | 8 |
| I.5.4 Capteurs à tubes sous vide | 8 |
| I.5.5 Capteurs à concentration | 10 |
| I.6 Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan | 10 |
| I.6.1 paramètres externes | 10 |
| I.6.2 Les paramètres internes | 10 |
| I.7 Etude descriptive des capteurs solaires plans | 11 |
| I.7.1 Composants d'un capteur solaire plan | 11 |
| I.7.1.1 Le vitrage | 11 |
| I.7.1.2 L'absorbeur | 11 |
| I.7.1.3 L'isolant | 12 |
| I.7.1.4 Le fluide caloporteur | 12 |
| I.7.1.5 Cadre | 12 |
| I.8 Principes de fonctionnement d'un capteur solaire plan | 13 |
| I.9 l'isolation | 14 |
| I.9.1 L'importance de l'isolation | 14 |
| I.9.2 Qualités d'une isolation idéale | 14 |
| I.9.3 les critères caractérisant un isolant | 15 |
| I.9.4 Qualités recherchées | 16 |
| I.9.5. Effet d'absorption d'humidité | 16 |
| I.9.6 Grande familles des isolants | 17 |
| Références bibliographiques | 18 |

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Fig. (1) : L'énergie solaire | 5 |
| Fig. (2) : Utilisation de l'énergie solaire | 6 |
| Fig. (3) : Capteurs solaires plans | 7 |
| Fig. (4) : Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif | 8 |
| Fig. (5) : Capteur plan vitré | 8 |
| Fig. (6) : Capteurs à tube sous vide | 9 |
| Fig. (7) : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide | 9 |
| Fig. (8) : Concentrateur cylindro-parabolique | 10 |
| Fig. (9) : Composants d'un capteur solaire plan | 13 |
| Fig. (10) : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés | 14 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tab (1) : Grande familles des isolants | 17 |
|---|----|

I. Introduction :

Les applications de l'énergie solaire thermique constitue à capter la chaleur par le soleil afin de la stocker et de la réutiliser par les besoins d'eau sanitaire et de chauffage.

L'utilisation de l'énergie solaire dans des applications thermiques a pour raisons de participer activement à la réduction d'émissions de CO₂ et de bénéficier d'une source d'énergie inépuisable et gratuite de préserver l'environnement.

Dans ce chapitre, nous donnons quelques généralités sur l'énergie solaire et l'utilisation de l'énergie thermique dans les capteurs solaires plans, ainsi que les isolants et leur importance pour minimiser les pertes thermiques.

I.1. L'énergie solaire :

L'énergie solaire fournit une température importante pour revitaliser la biosphère. Ce qui nous préoccupe, c'est l'utilisation directe de l'énergie solaire pour produire des températures qui permettent de multiples usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, et production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques.



Fig. (1) : photo d'un site de panneaux photovoltaïques.

I.2. Energie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. La chaleur utilise une onde électromagnétique propulsée par des photons lesquels sont des quantas d'énergie résultant de l'interaction électrons-protons. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air) [1].

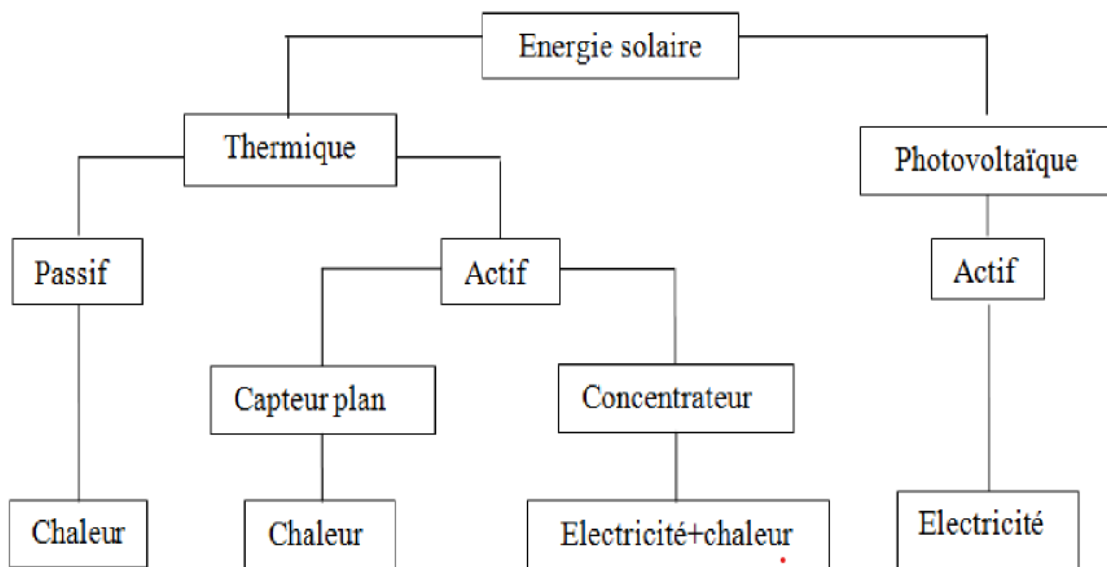


Fig. (2) : Utilisation de l'énergie solaire.

I.3. Façons d'en bénéficier du rayonnement solaire :

- En usage direct de la chaleur (basse température) : chauffe-eau, chauffages solaires, cuisson solaire, séchage solaire
- . - En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : climatisation solaire, centrales solaires thermodynamiques
- Concentration solaire (haute température), fours solaires. [1]

I.4. Catégories de capteurs solaires :

Principalement il y a deux grandes catégories de capteurs solaires :

- Les capteurs solaires photovoltaïques : qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- Les capteurs solaires thermiques : transforment l'énergie lumineuse en énergie thermique.

I.5. Différents types des capteurs solaires thermiques :

I.5.1. Capteurs solaires plans :

Les capteurs solaires plans, sont conçus pour la conversion de l'énergie solaire par voie thermodynamique ou bien la conversion thermique de l'énergie solaire. Ils sont constitués d'une surface réceptrice noire qui absorbe le rayonnement solaire incident visible de la bande spectrale ($0,3 < \lambda < 3$) du rayonnement direct et diffus. Au-dessus de l'absorbeur se trouve un système de couverture à simple ou à double vitrage, limite les pertes thermiques convectives avec l'air ambiant, ainsi que les pertes radiatives grâce à la propriété du verre pratiquement opaque dans le domaine de l'infrarouge. Une isolation sur la face arrière du capteur limite également les pertes thermiques par conduction et par convection. [2]

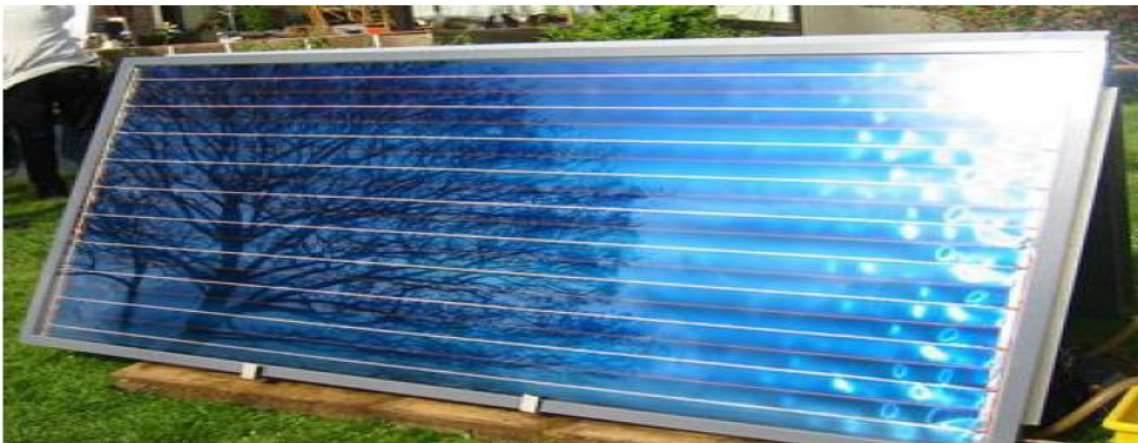


Fig. (3) : Capteurs solaires plans.

I.5.2. Capteurs plans non vitrés :

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. [3]



Fig. (4) : Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif.

I.5.3. Capteurs plans vitrés :

Ce type de capteurs peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple) [4]

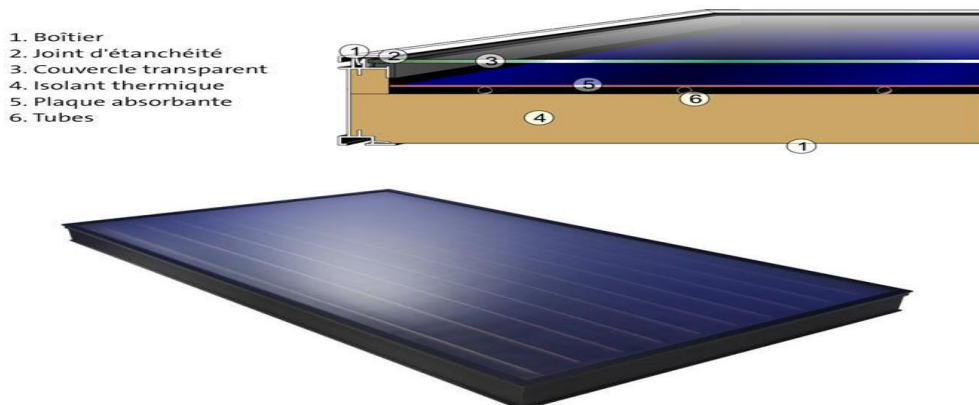


Fig. (5) : capteur plan vitré.

I.5.4. Capteurs à tubes sous vide :

Il s'agit d'un tube cylindrique porteur lui aussi d'un traitement de surface qui maximise l'absorption solaire. Suivant les technologies le cylindre sous vide est en fait constitué de 2 tubes concentriques emboîtés l'un dans l'autre. Entre ces 2 tubes est réalisé le vide d'air. Dans cette version, le vide n'est fait qu'entre les 2 tubes, la partie centrale du tube interne n'est pas sous vide. Dans une autre version il s'agit d'un seul tube transparent dans lequel le vide est complet. La restitution de l'énergie captée se fait au niveau d'un collecteur de chaleur placé au sommet du capteur dans lequel les tubes sous vides sont enfichés. La transmission d'énergie thermique au liquide caloporteur se fait par deux méthodes. Le premier fait passer directement le liquide caloporteur au contact de l'absorbeur, l'autre technique utilise un caloduc. Le caloduc est une simple tige de cuivre creuse qui contient une liquide à changement de phase. Au contact de la chaleur ce liquide se vaporise et échange sa chaleur au liquide caloporteur. Cet échange de chaleur le condense et ainsi de suite [5]



Fig. (6) capteurs à tube sous vide.

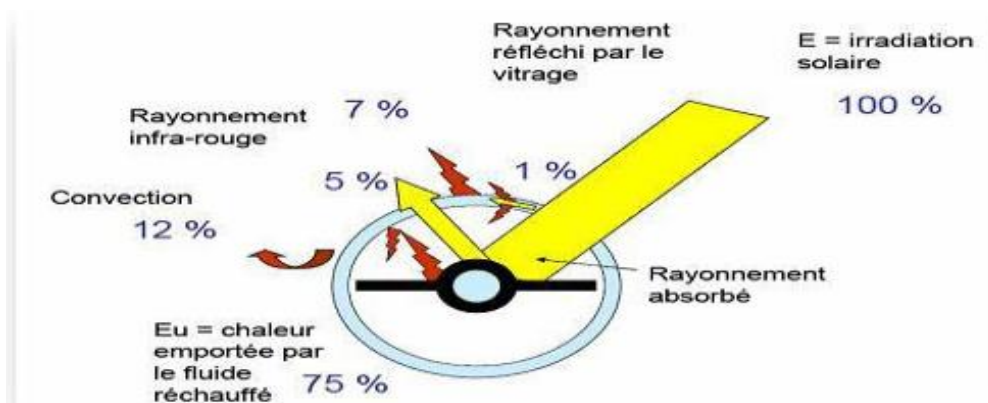


Fig. (7) : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.

I.5.5. Capteurs à concentration :

Dans les systèmes à concentration, le rayonnement solaire direct est reçu par une surface de grande taille appelée surface d'ouverture, puis dirigé vers un absorbeur de surface plus petite [5]



Fig. (8) Concentrateur cylindro parabolique.

I.6. Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan :

Les paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan peuvent être classés en deux catégories : les paramètres externes et les paramètres internes.

I.6.1. paramètres externes :

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont :

- Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- Température ambiante
- Vitesse du vent [6]

I.6.2. Les paramètres internes :

➤ Paramètres géométriques :

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes ; un meilleur rendement du capteur.

I.7.Etude descriptive des capteurs solaires plans :

I.7.1.Composants d'un capteur solaire plan :

Un capteur plan est constitué essentiellement [7]

- d'une couverture transparente (vitre)
- d'un absorbeur
- d'un fluide caloporteur l'eau et l'air.
- d'une isolation thermique
- d'un coffre

I.7.1.1.Le vitrage :

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- Recevoir et piégé le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

I.7.1.2.L'absorbeur :

Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes. En général, l'absorbeur n'est qu'une plaque plane en métal dont la couche superficielle donnant sur le soleil, doit être douée d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0.95.

L'absorbeur doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie

I.7.1.3.L'isolant :

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, par convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

Parties arrière et latérale :

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

I.7.1.4. Le fluide caloporteur :

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau, des mélanges eau glycol sont aussi employés à cause des conditions climatiques, ces mélanges ont une chaleur spécifique inférieure à celle de l'eau pure. Par rapport à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été et il n'y a pas de problème de corrosion. Néanmoins l'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux et les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau

I.7.1.5. Cadre :

Le cadre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolant, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques

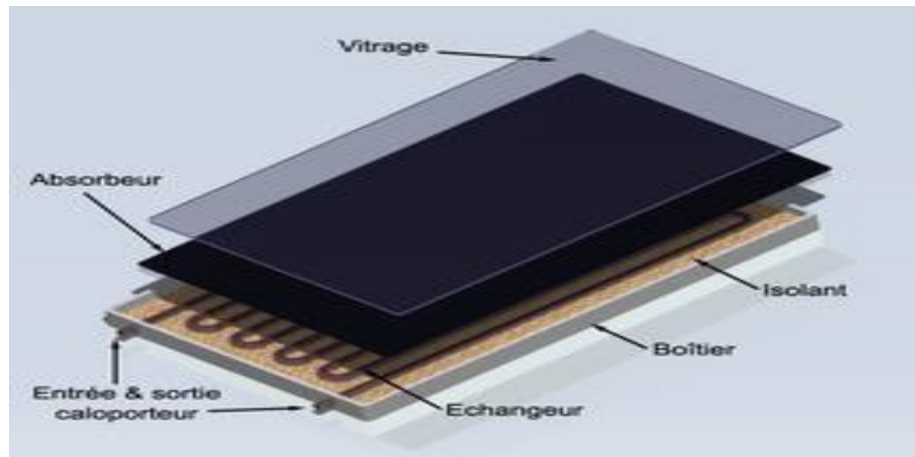


Fig. (9) Composants d'un capteur solaire plan

I.8.Principes de fonctionnement d'un capteur solaire plan :

Un capteur solaire plan destiné au chauffage des habitations ou à la production d'eau chaude est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident.

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement solaire thermique traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est réémise vers l'absorbeur. Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur. L'isolation thermique au-dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement. Un boîtier contenant le tout, calorifugé de manière à réduire les pertes vers l'arrière et les côtés. [8]

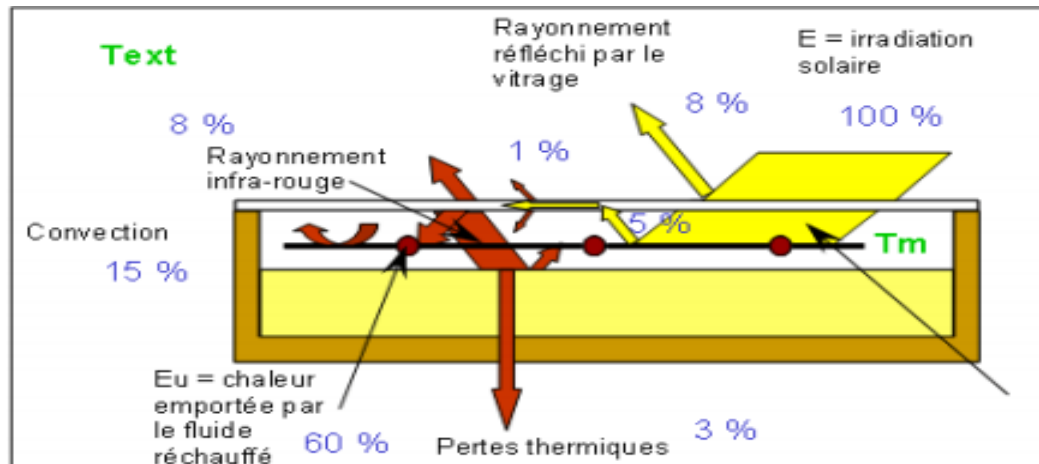


Fig. (10) : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés

I.9. L'isolation :

I.9.1. L'importance de l'isolation :

L'isolant est nécessaire dans les capteurs solaires thermiques pour emprisonner et concentrer l'énergie du soleil. En évitant les pertes thermiques au dos et sur les côtés du capteur, l'isolation va permettre d'optimiser son efficacité et de recueillir le maximum de chaleur qui sera ensuite transférée au fluide caloporteur. [9]

I.9.2. Qualités d'une isolation idéale :

Pour réaliser un bon isolant on doit utiliser les isolants ayant les qualités suivantes :

- une faible conductivité thermique.
- une faible densité (pour une faible inertie thermique)
- la chaleur massique doit être basse.
- une grande résistance thermique
- Masse volumique
- Température maximale d'utilisation.
- Son coût. [10]

I.9.3. Les critères caractérisent un isolant :

Conductivité thermique (λ) :

Exprimée en (W/m. k) caractérise le comportement du matériau lors du transfert de chaleur par conduction, elle désigne la quantité de chaleur le (flux de chaleur) qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde

Résistance thermique (R) :

La résistance thermique s'exprime en ($m^2 \cdot K/W$) est la capacité d'un produit à conserver la chaleur, et s'obtient par le rapport de l'épaisseur de l'isolant (en mètres) sur le coefficient de conductivité thermique λ ($R=e/\lambda$).

Coefficient de transmission surfacique :

Il est utilisé pour caractériser une paroi dans sa globalité avec l'ensemble des matériaux qui la compose. Il représente le flux de chaleur qui traverse $1m^2$ de paroi pour une différence de température de $1^\circ C$ entre l'extérieur et l'intérieur du capteur. Il s'agit simplement de l'inverse de la résistance thermique R.

Masse volumique ou la densité(ρ) :

La Densité exprimée en (kg/m^3) Permet d'évaluer le comportement d'un matériau face à la propagation de chaleur, car plus cette valeur est élevée plus le matériau sera capable d'emmagasiner la chaleur et donc de la retenir.

Chaleur spécifique (Cp) :

Exprimée en (j/kg. k) La chaleur spécifique d'un matériau est sa capacité à stocker de la chaleur par rapport à son poids

Capacité thermique :

La capacité thermique (volumique) d'un matériau représente la quantité totale de chaleur que $1 m^3$ de matériau est capable de stocker pour une augmentation de température de $1^\circ C$. Elle est exprimée par le produit de la densité du matériau (ρ en kg/m^3) et de sa chaleur spécifique (j/kg. k)

Diffusivité thermique :

La diffusivité thermique d'un matériau est associée à la vitesse à laquelle celui-ci monte en température lorsqu'il est soumis à une source de chaleur. Elle se calcule par le rapport et ($\lambda / \rho c$) s'exprime en (m^2/s). Plus la diffusivité thermique est élevée, plus la température du matériau évoluera rapidement.

Effusivité thermique :

L'effusivité thermique d'un matériau est associée à la quantité de chaleur que le matériau est capable d'absorber lorsqu'il est soumis à une source de chaleur pendant un certain temps. Elle est calculée par la relation $(\lambda * \rho c)^2$ et s'exprime en $J/(m^2 \cdot k \cdot s)^{1/2}$

Inertie thermique :

Exprime le potentiel de stockage de la chaleur ou de la fraîcheur d'un local. Les composants à forte inertie conservent une température stable et se réchauffent ou se refroidissent très lentement alors que celles à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de température. On parle d'inertie de transmission pour les parois soumises à l'exposition solaire et d'inertie d'absorption pour les parois internes ou périphériques.

I.9.4. Qualités recherchées :

- Un faible coefficient de conductivité thermique pour freiner l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.
- Une forte densité et une bonne aptitude à accumuler la chaleur
- Propriétés économiques : coût du matériau, de sa mise en œuvre et selon le cas des maintenances, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.
- une bonne longévité.
- aucune nocivité afin de ne pas porter atteinte à la santé
- leur possibilité d'être recyclés.

I.9.5. Effet d'absorption d'humidité :

Les températures élevées affectent négativement la santé humaine, car les matériaux qui absorbent l'humidité sont plus susceptibles de former des moisissures, des champignons et des toxines.

Par conséquent, il convient de prêter attention à la sensibilité du matériau à l'exposition à l'humidité ou à sa capacité à résister, ce qui, avec le temps, entraîne des dommages pour la santé.

I.9.6. Grandes familles des isolants :

Il existe plusieurs familles d'isolateurs, où leurs caractéristiques diffèrent d'une famille à l'autre :

Tab (1) : Grandes familles des isolants [11]

| Grande familles | Les isolants | Conductivité λ (W/m K.) | avantage |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------|--|
| isolants naturels | -Cellulose | 0.039 | régulent l'hygrométrie très bons isolants bon isolant résistant longue durée de vie écologique durable performante |
| | -Laine de coton | 0.037 | |
| | -Chanvre | 0.042 | |
| | - Bois | 0.036 | |
| | -Liège expansé | 0.032 | |
| Isolants minéraux | Laine de verre | 0.045 | peu coûteuses recyclables excellentes performances peu inflammables |
| | Laine de roche | 0.047 | |
| | Verre cellulaire | 0.055 | |
| Isolants synthétiques | Polyuréthane | 0.035 | performants économiques faciles à poser sur tout support ne craignent pas l'humidité |
| | Polyisocyanurate | 0.038 | |
| | Mousse phénolique | 0.045 | |
| | Polystyrène expansé | 0.042 | |
| | Polystyrène extrudé | 0.040 | |

Références :

[1] **D. Ababsa**, Optimisation du rendement d'un capteur Solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de Magistère, la faculté des sciences-département de physique de Batna, (2010).

[2] **A. Khodja**, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie Climatique, Constantine (2004).

[3] **S. Souad**, effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur, Mémoire de Magistère, Université de Constantine (2010)

[4] **F.A. Taha**, Développement d'un logiciel de simulation des Performances thermiques des capteurs solaires plans» Mémoire de magister de L'Université Mohamed Khider Biskra (2013).

[5] **F.Kalla**, Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire, Mémoire de Magistère, Université de Batna (2014).

[6] **A.Boussag**, Etude expérimentale de l'effet de l'isolant sur le fonctionnement du capteur thermique Mémoire de Master Université de Msila(2017).

[7] **D, K, Edwards**. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979)

[8] **N. Bellel**, Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries. Thèse de doctorat <https://www.mychauffage.com/blog/les-differents-types-d-isolants#tableaux>

CHAPITRE II

Les Matériaux Composites

Sommaire :

| | |
|--|----|
| II.1 Introduction | 22 |
| II.2 Composants des matériaux composites | 23 |
| II.2.1 La matrice | 23 |
| II.2.2 Le renfort | 23 |
| II.3 Classification des matériaux composites | 23 |
| II.3.1 Classification selon la catégorie du renfort | 23 |
| II.3.1.1 Les différents types de renfort (fibres) | 24 |
| II.3.2 Classification selon le type de matrice | 25 |
| II.3.2.1 Les matrices organiques | 26 |
| II.3.2.1.1 Résine thermodurcissables | 26 |
| II.3.2.1.2 Résine thermoplastique | 26 |
| II.3.3 Matrices Céramiques | 27 |
| II.3.4 Les matrices métalliques | 27 |
| II.3.5 Matrices naturelles | 27 |
| II.4 Les Constituants des Matériaux composite | 28 |
| II.5 Matériaux composites structuraux | 29 |
| II.5.1 Monocouches | 29 |
| II.5.2 Stratifiés | 29 |
| II.5.3 Sandwichs | 30 |
| II.5.3.1 Le coure | 30 |
| II.5.3.2 La peau | 30 |
| II.6 Différents types de sandwiche | 30 |
| II.7 Les matériaux composites et la conductivité | 31 |
| II.7.1 Matériaux divers | 32 |
| II.7.2 Matériau à base de bois | 32 |
| II.8 Le palmier dattier | 33 |
| II.8.1 Bois de palmier dattier | 34 |
| II.8.2 Les palme | 34 |
| II.8.3 Composition chimique des fibres de palmier | 35 |
| II.8.4 Propriétés thermo physiques | 35 |
| II.8.5 Conductivité thermique du bois de palmier dattier | 35 |
| II.8.5.1 Fibres de bois du tronc | 36 |
| II.8.5.2 Les fibres des pétioles | 36 |
| II.8.5.3 Palme ou feuille | 37 |
| II.9 Bois à base de palmier dattier | 37 |
| II.10 Méthode de la plaque chaude gardée | 38 |
| II.10.1 Principe de l'appareillage | 38 |
| II.10.2 Types d'appareillage | 38 |
| II.10.3 Étapes de calcul la conductivité thermique | 39 |

| | |
|-------------------|----|
| Références | 42 |
|-------------------|----|

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Fig. (1) : Matériau composite | 22 |
| Fig. (2) : Différents constituants d'un matériau composite. | 23 |
| Fig. (3) : Classification des renforts | 24 |
| Fig. (4) : Classification des composites selon la matrice | 26 |
| Fig. (5) : Composite Monocouches. | 29 |
| Fig. (6) : Structure composite stratifié | 29 |
| Fig. (7) : Composite sandwichs | 30 |
| Fig. (8) : Différentes parties d'un palmier dattier | 33 |
| Fig. (9) : Représentation schématique de la palme | 34 |
| Fig. (10) : Composition chimique des fibres de palmier (% en poids) | 35 |
| Fig. (11) : Conductivité thermique du bois de palmier dattier | 36 |
| Fig. (12) : Plaque Bois de palmier dattier | 37 |

Liste des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tab(1) : Le différent type de fibres | 25 |
| Tab(2) : Constituants des Matériaux composite | 28 |
| Tab(3) : les différent types de sandwiches. | 31 |
| Tab(4) : matériaux composites et la Conductivité | 32 |

II.1 Introduction

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. [1]

Le consensus sur la définition de matériau composite s'articule autour du fait que le composite est un matériau multi-phase formé à partir d'une combinaison de matériaux qui diffèrent par leur composition et leur forme. Ces composants sont généralement la matrice et les renforts, liés les uns aux autres en conservant leurs identités et propriétés. Ces constituants doivent assurer une forte capacité d'adhésion afin de constituer un matériau aux propriétés nouvelles qui ne peuvent être obtenues par aucun des composants d'origine agissant seuls. L'intérêt croissant des composites est dû principalement aux possibilités de gain de poids et de réalisation de pièces complexes [2].

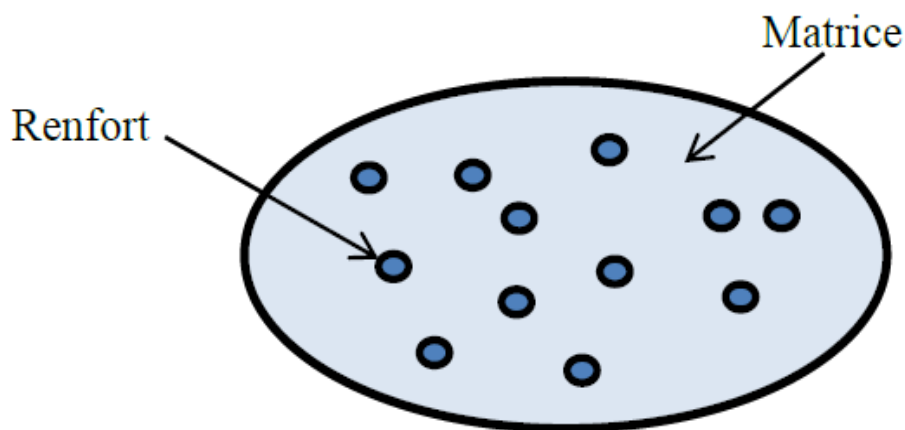


Fig. (1) : Matériau composite. [3]

II.2 Composants des matériaux composites :

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle D'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de Protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. [4]

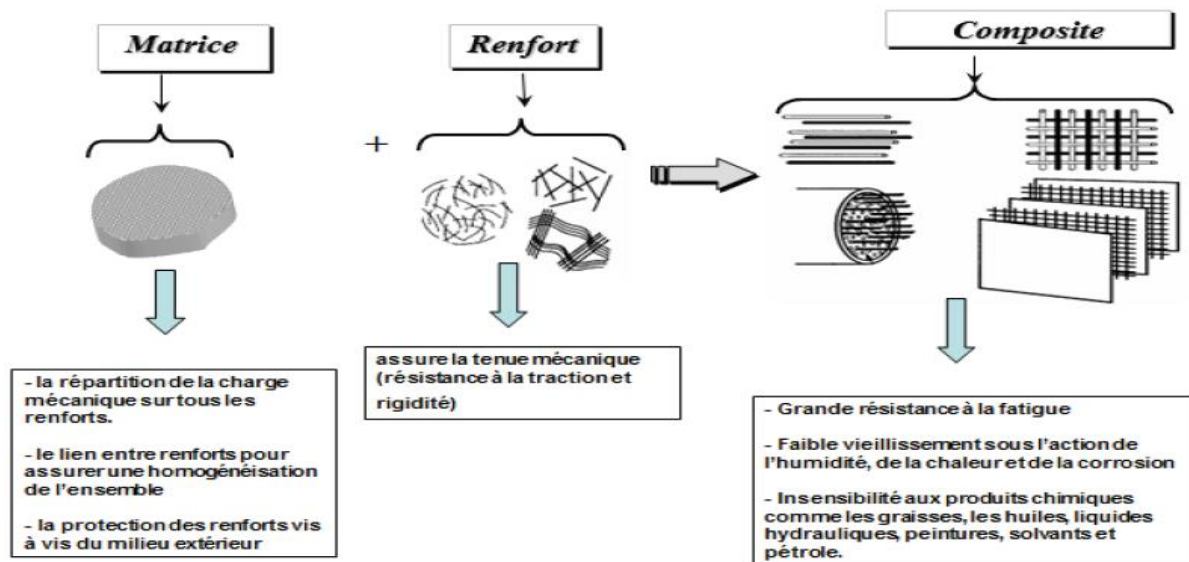


Fig. (2) : Différents constituants d'un matériau composite. [5]

II.2.1 La matrice :

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des Matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts

II.2.2 Le renfort :

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine ; son Rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres [6].

II.3 Classification des matériaux composites :

II.3.1 Classification selon la catégorie du renfort :

La matrice est renforcée avec différentes fibres en termes d'origine ou de forme.

Les composites fibreux peuvent être classés en deux catégories selon les catégories des fibres : fibres inorganiques et fibres organiques. Ces fibres peuvent se présenter sous différentes formes : forme linéique, forme surfacique et en forme multidirectionnelle [7]

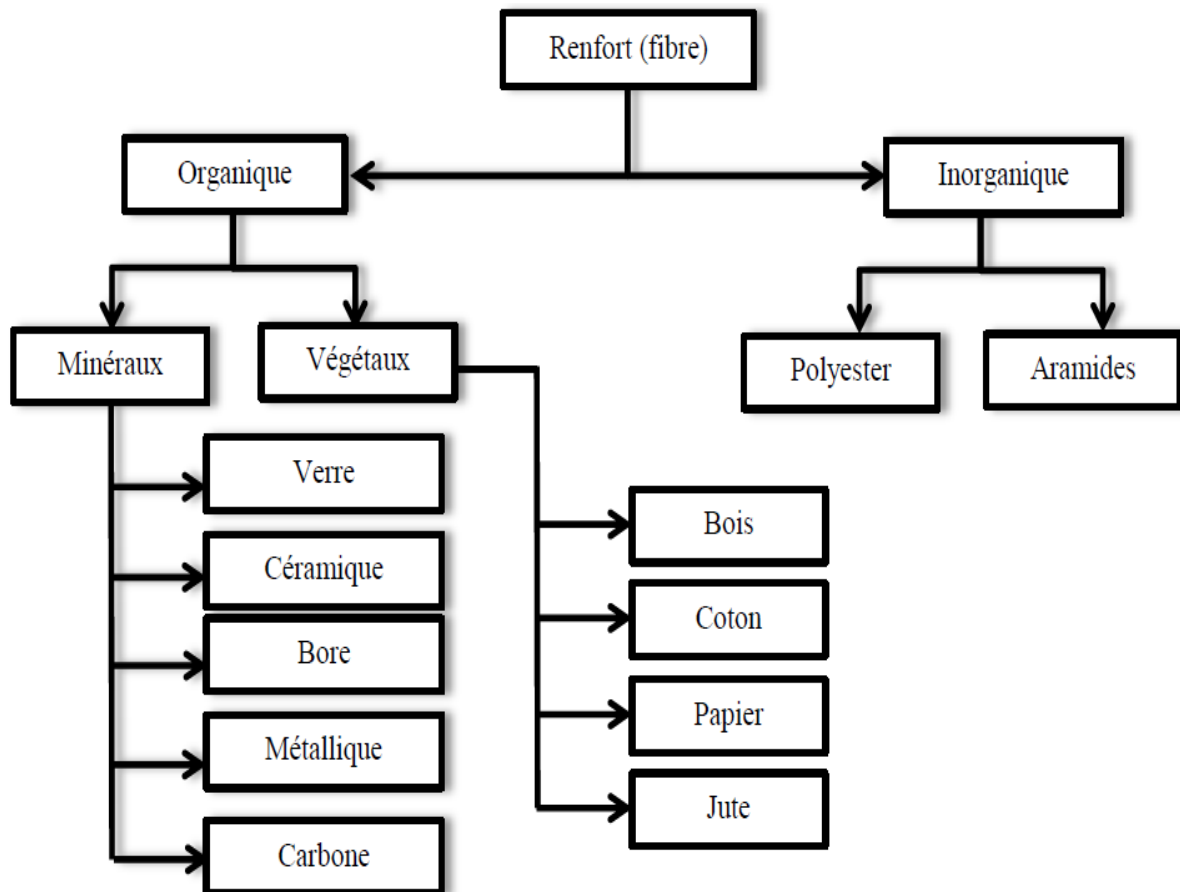
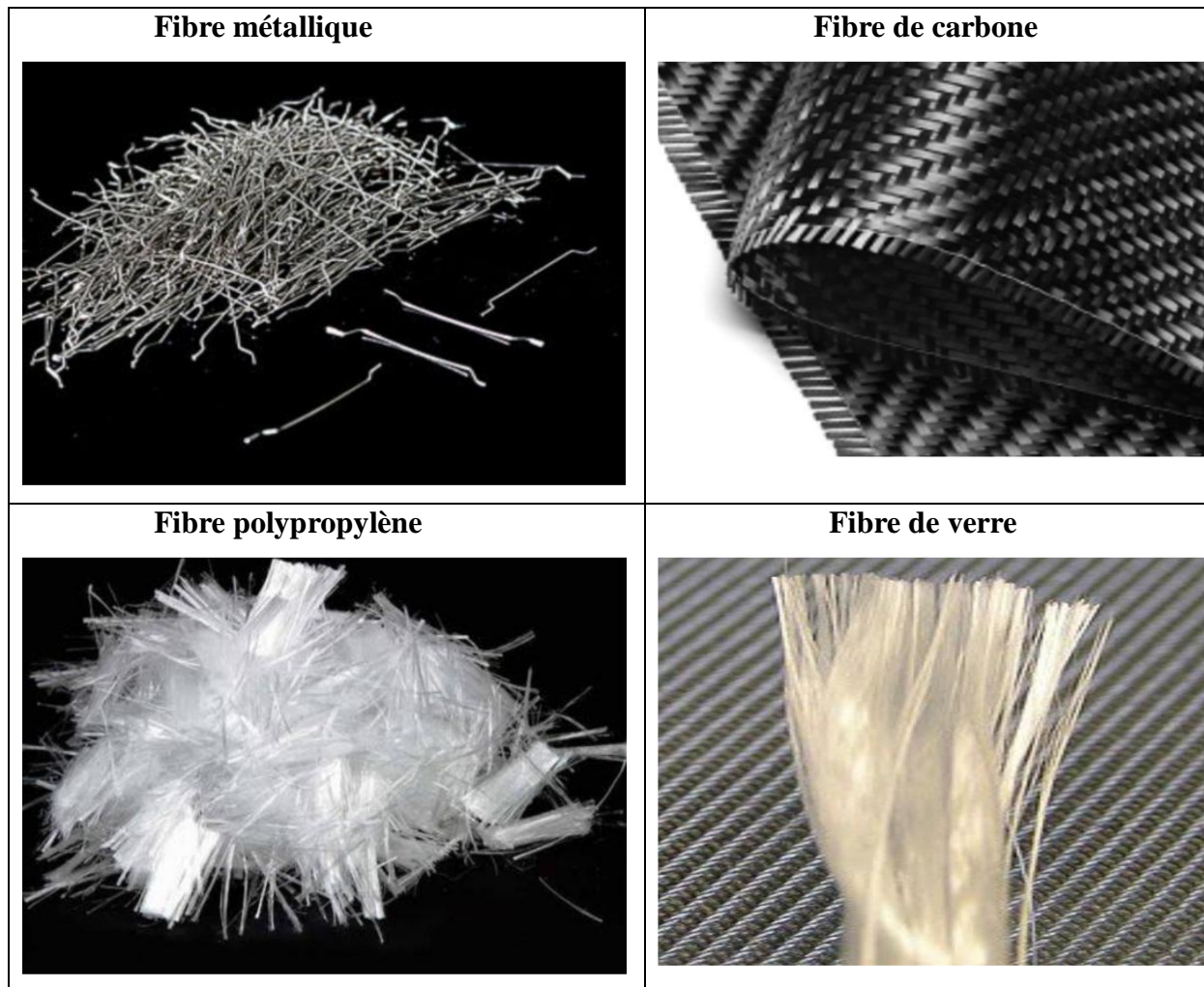


Fig. (3) : Classification des renforts [8].

II.3.1.1 Les différents types de renfort (fibres) :

Ses caractéristiques et ses formes varient, comme le tableau suivant montre différents types de renfort :

Tab(1) : Les différents types de fibres [9]



II.3.2 Classification selon le type de matrice :

La classification habituellement utilisée dans ce cas est décrite selon les trois

Principales matrices utilisées, les composites à matrice organique CMO, les composites à matrice céramique CMC et les composites à matrice métallique CMM [10]. Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles ont été utilisées [11].

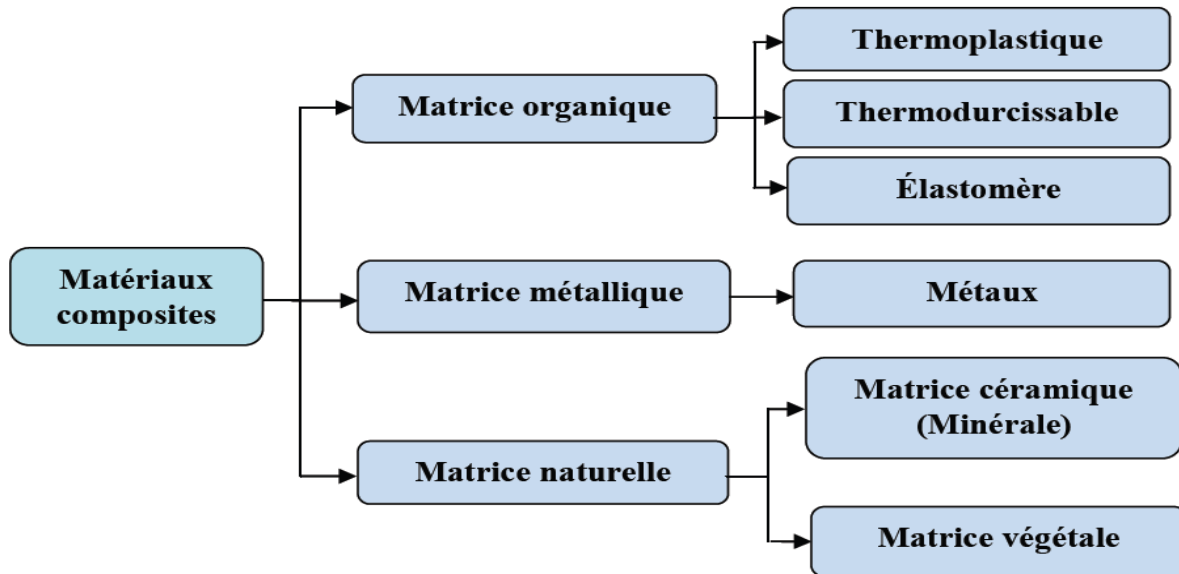


Fig. (4) : Classification des composites selon la matrice [12]

II.3.2.1 Les matrices organiques :

II.3.2.1.1 Résine thermodurcissables :

Ces matrices se présentent sous forme d'une résine initialement à l'état de liquide visqueux, composé de molécules longues et indépendantes. Ces molécules établissent alors des liaisons, et ces réactions sont déclenchées le plus souvent grâce à l'action conjointe d'un durcisseur et de la température. Il se forme ainsi une structure solide tridimensionnelle. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les deux principales résines utilisées sont les polyesters (environ 70%) et les époxy (25%) [13].

On distingue donc trois types de matrices thermodurcissables :

- Les résines polyesters.
- Les résines de condensation.
- Les résines époxydes.

II.3.2.1.2 Résine thermoplastique :

Ce sont des matériaux semi-cristallins comportant une phase amorphe et une phase semi-cristalline [14]

On cite les exemples suivantes :

- Polypropylène (pp).
- Polysulfure de phénylène (PPS)
- Polycarbonate polyamide (PA).
- Polyéther-sulfone (PES)
- Polyéther-imide (PEI)
- Polyéther-éther-cétone (PEEK)

II.3.3 Matrices Céramiques :

Des composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de Préformés de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone). [15]

II.3.4 Les matrices métalliques :

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C. Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales. [15]

II.3.5 Matrices naturelles :

La matrice naturelle est composée de polymères d'origine naturelle issus de la Transformation chimique de deux ou plusieurs constituants différents, solides et liquides. Les sources d'extraction de la matière solide sont minérales (chaux, argile, enduit), végétales (chimie des sucres ou lipo chimie) ou animales (graisse, os). Les liquides peuvent être des huiles végétales, de l'alcool végétal ou tout simplement de l'eau. [16]

II.4 Les Constituants des Matériaux composite :

Le tableau suivant représente les composants majeurs et mineurs des matériaux composites et leurs domaines d'utilisation :

Tab(2) : Constituants des Matériaux composite

| Type de composite | Les Matériaux | Constituants | Domaines d'application |
|---------------------------------|---|---|---|
| Composites à matrice organique | Papier, carton | Résine/charges/fibres cellulosiques | Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sport, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples |
| | Panneaux de particules | Résine/copeaux de bois | |
| | Panneaux de fibres | Résine/fibres de bois | |
| | Toiles enduites | Résines souples/tissus | |
| | Matériaux d'étanchéité | Elastomères/bitume/textiles | |
| | Pneumatiques | Caoutchouc/toile/acier | |
| | Stratifiés | Résine/charges/fibres de verre, carbone, etc. | |
| Composites à matrice minérale | Plastiques renforcés | Résines/microsphères | Génie civil Aviation, espace, sport, biomédecine Pièces thermomécaniques |
| | Béton | Ciment/sable/granulats | |
| | Composite carbone-carbone | Carbone/fibres de carbone | |
| Composites à matrice métallique | Composite céramique | Céramique/fibres de céramiques | Espace |
| | Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone | Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone | |

II.5 Matériaux composites structuraux :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

II.5.1 Monocouches :

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de Monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

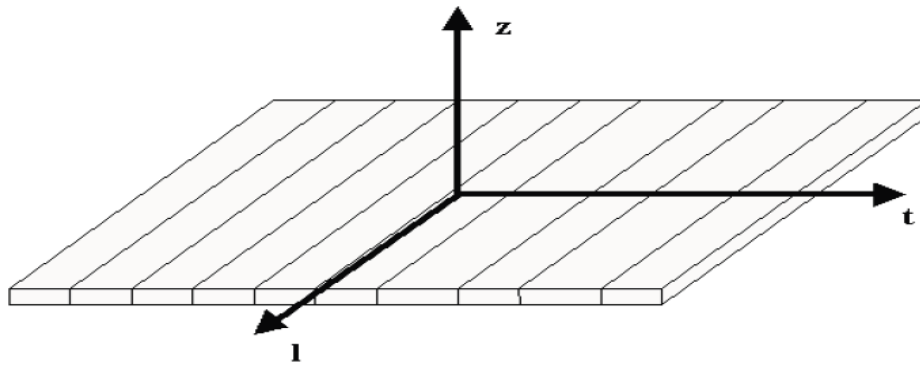


Fig. (5) : composite Monocouches. [17]

II.5.2 Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une Orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

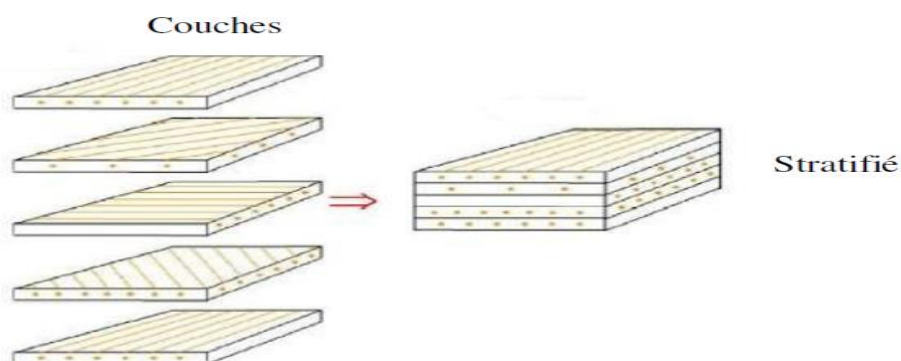


Fig. (6) : Structure composite stratifié [17]

II.5.3 Sandwichs :

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance.

L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. [17]

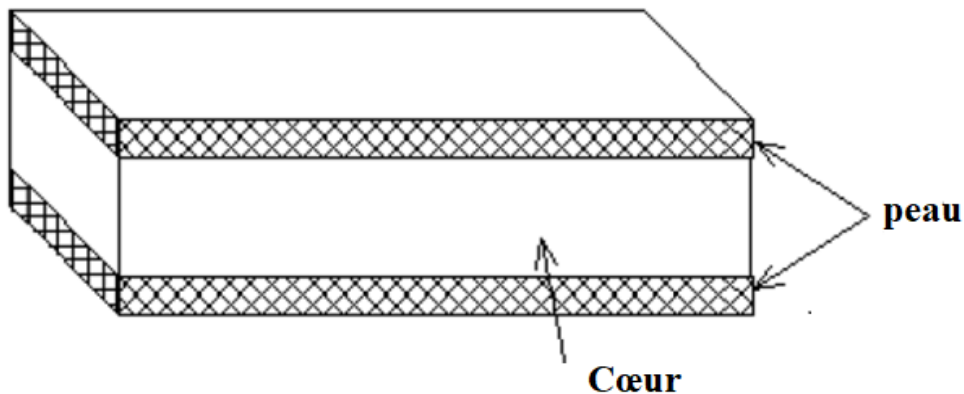


Fig. (7) : Composite sandwichs. [17]

II.5.3.1 Le cœur :

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme cœur.

Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- Matériaux solides à faible densité : balsa et d'autres types de bois.
- Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

II.5.3.2 La peau :

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, ... etc.


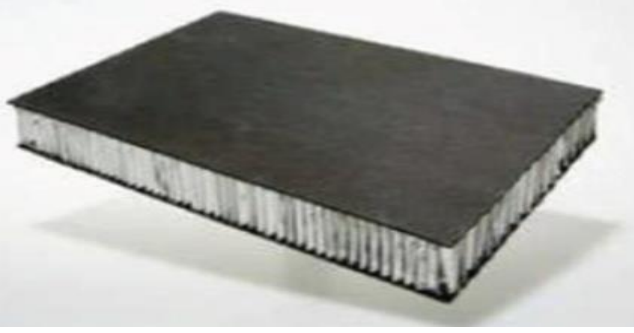
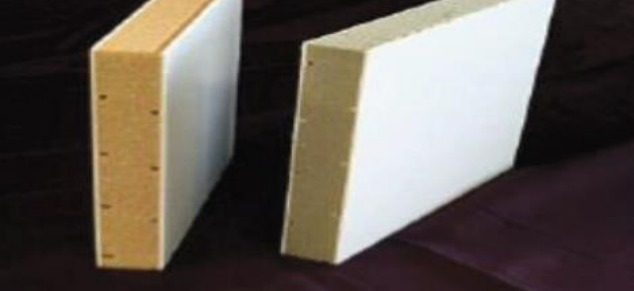

Le choix des matériaux utilisés comme peau est important car la présente partie

Entre en contact direct avec l'environnement de travail

II.6 Différent types de sandwich :

Les formes indiquées dans le tableau représentent les types de sandwichs

Tab(3) : les différents types de sandwichs. [18]

| types de sandwich | la forme |
|---------------------------------------|--|
| fibre de verre nid d'abeille |  |
| fibre de carbone nid d'abeille |  |
| fibre de verre mousse pvc |  |
| Fibre de verre mousse polyuréthane |  |

II.7 Les matériaux composites et la Conductivité :

Dans les tableaux suivants, on reconnaît les matériaux composites les plus connus et les plus utilisés côté isolant, ainsi que leur conductivité thermique :

Tab(4) : matériaux composites et la Conductivité [19]

| les Matériau | Conductivité λ (W/m K.) |
|--|---------------------------------|
| liège aggloméré | 0,049 |
| Polypropylène (pp) | 0.22 |
| Laine minérale (MW) | 0.045 |
| Polyamide avec de fibres de verre (25 %) | 0.30 |
| Mousse phénolique – revêtu (PF) | 0.045 |
| Polyuréthane – revêtu (PUR/PIR) | 0.035 |
| Cartons feutres | 0.23 |
| Verre cellulaire (CG) | 0.055 |
| Chlorure de polyvinyle (PVC) | 0.17 |
| Vermiculite | 0.065 |
| Vermiculite expansée (panneaux) | 0.090 |

I.7.1 Matériaux divers :

| | |
|---------------------------|------|
| Verre | 1 |
| Carreaux de terre cuite | 0.81 |
| Carreaux de grès | 1.20 |
| Caoutchouc | 0.17 |
| Linoléum, carreaux de PVC | 0.19 |

I.7.2 Matériau à base de bois :

| | |
|---|-------------|
| Polyester renforcé en fibres de verre | 0.176 |
| contre-plaqué | 0.11 à 0.15 |
| Bois de charpente | 0.13 |
| Panneau de contreplaqué | 0.09 |
| Panneau de particules ou d'aggloméré | 0.10 |
| Panneau d' OSB (oriented strand board) | 0.13 |
| Panneau de fibres de bois (y compris MDF) | 0.07 |

II.8 Le palmier dattier :

La biomasse végétale est une matière première, naturelle et de surcroît renouvelable servant à de multiples usages tout au long de l'existence humaine. Cependant, l'élan prit par les différentes activités agricoles et forestières s'est progressivement estompé avec l'avènement au début du XIXème siècle, de la révolution industrielle.

L'épuisement inouï des ressources mondiale en pétrole et en gaz au regard du d'objectif souligné et adopté à l'unanimité par les différents pays du monde lors de la COP 21 relatif au concept du développement durable et de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre que représente l'exploitation de ces ressources à conduit à porter un regard neuf sur les agro ressources et à redécouvrir qu'elles pouvaient être éco-compatibles, sous certaines conditions que les efforts de recherche développement permettront de préciser.

Dans ce contexte, le palmier dattier génère, en Algérie, à lui seul une ressource naturelle, renouvelable estimée à plus de 252 millions de palmes engendrées par l'opération de toilettage annuelle. Cette ressource quant appellera bois de palmier dattier est considérée comme étant un déchet ligneux sans valeur ajoutée et ne trouve pas d'application dans le tissu industrielle national. Les déchets du bois de palmier dattier Phoenix Dactylifera L peuvent être classés en 04 types de fibres notamment :

Le bois (stipe),

Les feuilles,

La tige (rachis et pétiole),

Les fibres de surface (leaf)



Fig. (8) : Différentes parties d'un palmier dattier [20]

II.8.1 Bois des Palmiers dattiers :

Le palmier dattier revêt une importance particulière parmi les espèces végétales cultivées au Sahara avec un rôle majeur dans l'équilibre des écosystèmes oasiens. Il constitue pour les populations des régions sahariennes l'arbre de la providence qui fournit non seulement des dattes, nourriture riche pour les hommes et les animaux, mais aussi un grand nombre de productions diverses

L'Algérie compte plus de 18,7 millions de palmiers réparties sur une surface de 169 361 ha en 2009 [21].

II.8.2 Les palme :

Les palmes sont des feuilles composées, pennées, insérées en hélice très rapprochée sur le stipe.

La palme est composée de trois parties à savoir :

- Le pétiole, de 50cm à plus d'un mètre de longueur, forme la base de la palme et couvert d'épines sur les cotés.
- Le rachis semi-cylindrique, épineux vers la base et dur.
- Les folioles dont les premières situées au-dessus des épines sont plus longues que celles situées à l'extrémité supérieure de la palme. Elles sont portées sur les deux côtés du rachis. De forme oblique pliée longitudinalement.

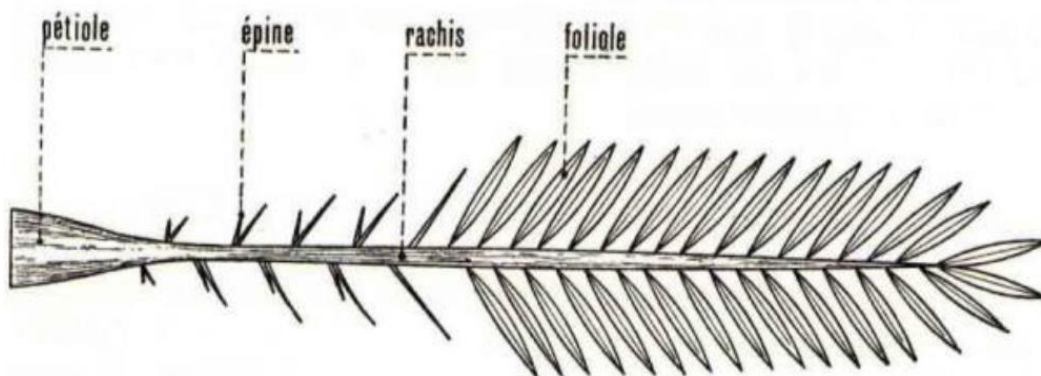


Fig. (9) : Représentation schématique de la palme [20].

II.8.3 Composition chimique des fibres de palmier :

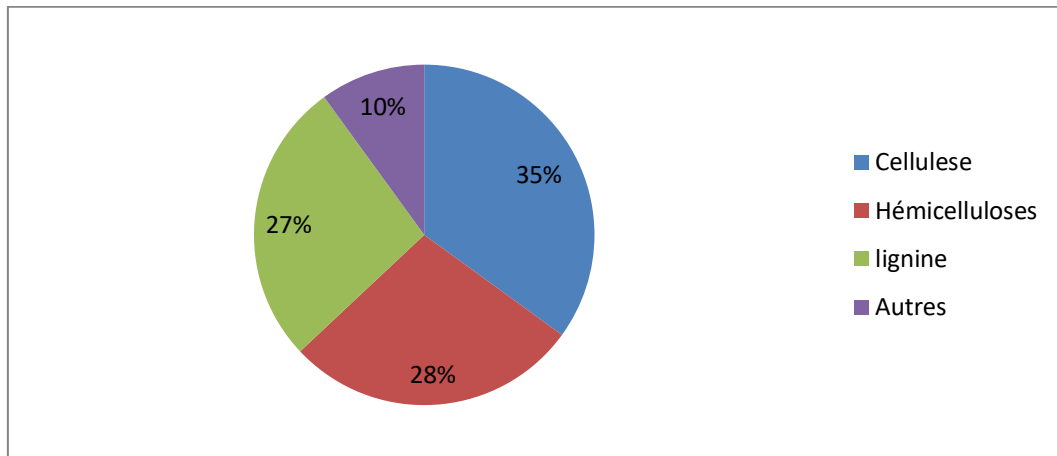


Fig. (10) : Composition chimique des fibres de palmier (% en poids)

II.8.4 Propriétés thermo physiques :

La conductivité thermique et de la masse volumique du bois de palmier dattier (valeurs obtenues pour le pétiole de la variété Deglet-Nour) [21]

| le pétiole de la variété Deglet-Nour | conductivité thermique (W/m. K) | Diffusivité thermique (m ² /s). |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| | 0.072 à 0.085 | 1.91 à 3.31 |

II.8.5 Conductivité thermique du bois de palmier dattier

La conductivité thermique du bois de palmier dattier est étudiée par [Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]. Les auteurs rapportent une conductivité thermique $\lambda = 0,083$ (W/m .K.)

Dans la figure suivant des échantillons pris de la partie pétiolaire à l'aide de la Méthode de la plaque chaude gardée



Fig. (11) : Mesure de la Conductivité thermique du bois de palmier dattier

Les résultats de l'étude thermo-physique ont révélés que [22] :

- L'effet de l'orientation des fibres sur la conductivité thermique est négligeable.
- Les variétés de palmier dattier ont un faible effet sur la conductivité thermique avec une valeur moyenne de 0.083 (W/m .K) mesurée à la pression atmosphérique.
- La conductivité thermique de bois de palmier dattier est proche de la gamme de nombreux matériaux naturels d'isolation.
- La masse volumique de bois de palmier dattier est légèrement supérieure à celle de liège et du chanvre (276 kg.m-3 pour la partie pétiole de palmier dattier de type Deglet-Noor).

II.8.5.1 Fibres de bois du tronc :

C'est un tronc non ramifié, monopodique, il a un port élancé de couleur brune, lignifié, recouvert des bases des pétioles des anciennes palmes desséchées. La hauteur du stipe peut dépasser vingt mètres. Ce stipe est doté d'un seul bourgeon terminal assurant sa croissance en longueur. Ce bourgeon terminal initie des palmes (frondes), des bourgeons végétatifs et des inflorescences, il est généralement cylindrique. L'enveloppe extérieure, l'écorce, n'est qu'une expansion de la base des pétioles des feuilles. [23].

II.8.5.2 Les fibres des pétioles :

Les fibres des pétioles ne forment pas un tissu comme dans le bois ordinaire. Ce tissu présente des couches assez semblables à des toiles d'araignées (elles sont placées sans ordre, les unes à côté des autres). Le tronc n'est composé que des fibres pétioles superposées de l'intérieur à l'extérieur. Ceci explique que le bois est plus dur à l'extérieur qu'à l'intérieur [23].

II.8.5.3 Palme ou feuille :

La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir du bourgeon et perdu nombre similaire de palmes par dessèchement [24].

II.9 Bois à base de palmier dattier :

Actuellement, le bois fibreux de la palme est utilisé comme une alternative aux Déchets de bois classique dans la fabrication des différentes plaques de bois industriel (MDF, HDF, LDF,...) Cette technique est utilisée par de nombreux Fabricants industriels dans le monde D'autre part, les fibres extraites du bois Fibreux de palme attirent l'intérêt des chercheurs pour être utilisées comme renfort dans les matériaux composites [25].



Fig. (12) : Plaques de bois de palmier dattier

II.10 Méthode de la plaque chaude gardée :

II.10.1 Principe de l'appareillage :

L'appareillage à plaque chaude gardée a pour rôle d'établir à travers l'éprouvette (ou les éprouvettes) en forme de plaque uniforme ayant des faces planes et parallèles, une densité de flux thermique constante et uniforme en régime stationnaire tel que celui existant dans une plaque infinie bordée par deux plaques isothermes et uniformes ayant des faces planes et parallèles.

II.10.2 Types d'appareillage :

À partir de ce principe de base, on obtient deux types d'appareillage à plaque chaude gardée, à savoir :

- a) appareillage à deux éprouvettes (et un élément de chauffage central);
- b) appareillage à une seule éprouvette.

Appareillage à deux éprouvettes :

Dans l'appareillage à deux éprouvettes une plaque plane centrale composite ronde ou carrée constituée d'une source chauffante et de plaques métalliques de surfaçage, appelée élément chaud, est intercalée entre deux éprouvettes aussi identiques que possible. Le flux thermique est transmis au travers des éprouvettes à d'autres plaques planes, isothermes, rondes ou carrées appelées éléments froids.

Appareillage à une seule éprouvette :

Dans l'appareillage à une seule éprouvette la seconde éprouvette est remplacée par la combinaison d'un élément isolant et d'une plaque gardée. Une différence de température égale à zéro est alors établie au travers de ce dernier ensemble. Sous réserve que les autres exigences applicables de la présente Norme internationale soient satisfaites, des mesures précises et un compte rendu en accord avec la méthode peuvent être réalisés avec cet appareillage mais une référence particulière à la modification, par rapport à l'appareil normal à plaque chaude gardée à deux échantillons, doit figurer dans le rapport d'essai.

- **Éléments chauds et froids :**

L'élément chaud est composé d'une zone centrale de mesure distincte dans laquelle peut être établie une densité de flux thermique uniforme et unidirectionnelle constante, entourée par une zone de garde séparée de la précédente par un déjoint étroit. Les éléments froids peuvent être

composés d'un ensemble continu de plaques planes, mais il est préférable qu'ils aient une forme similaire à celle de l'élément chaud.

II.10.3 Étapes de calcul la conductivité thermique :

a- Mesurage de la densité de flux thermique :

Avec l'établissement d'un régime stationnaire dans la zone de mesure, la densité de flux thermique, q , est déterminée par la mesure du flux thermique, Φ , et de la zone de mesure, A , que traverse Φ .

b- Mesurage de la différence de température :

La différence de température aux bornes des éprouvettes, ΔT , est mesurée par des capteurs de température fixés à la surface des plaques métalliques et/ou à la surface des éprouvettes lorsque c'est approprié.

c- Mesurage de la résistance thermique ou du facteur de transfert :

La résistance thermique, R , est calculée à partir de q , A et ΔT , si les conditions appropriées données sont remplies. Si l'épaisseur d , de l'éprouvette est mesurée, on peut calculer le facteur de transfert, J .

d- Calcul de la conductivité thermique :

La conductivité thermique, moyenne, λ , d'une éprouvette peut aussi être calculée si les conditions appropriées données sont remplies et si l'épaisseur, d , de l'éprouvette est mesurée.

- **Limites dues à l'appareillage :**

L'application de la méthode est limitée par la possibilité de l'appareillage de maintenir une densité de flux thermique constante uniforme et unidirectionnelle dans l'éprouvette et par la possibilité de mesurer la puissance, la température et les dimensions dans les limites de la précision exigée. [25]

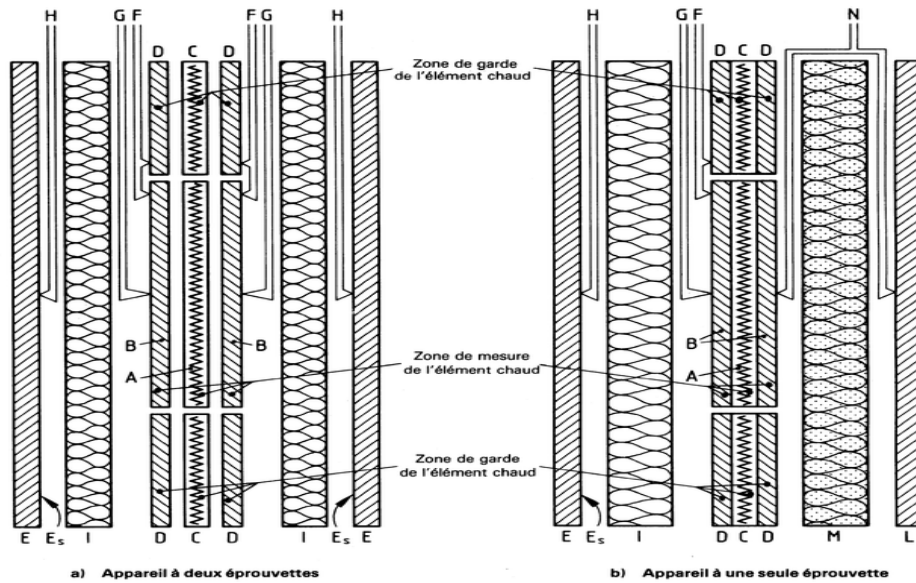


Fig. (6) : une illustration des composants appareil de la plaque chaude gardée [26]

- A Élément chauffant de la zone de mesure
- B Plaques de surfaçage de la zone de mesure
- C Élément chauffant de la zone de garde
- D Plaques de surfaçage de la zone de garde
- E Élément froid
- E_s Plaques de surfaçage de l'élément froid
- F Thermocouples différentiels
- G Thermocouples de surface de l'élément chaud
- H Thermocouples de surface de l'élément froid
- I Éprouvette
- L Plaque de garde
- M Isolation de la plaque de garde
- N Thermocouples différentiels de la plaque de garde

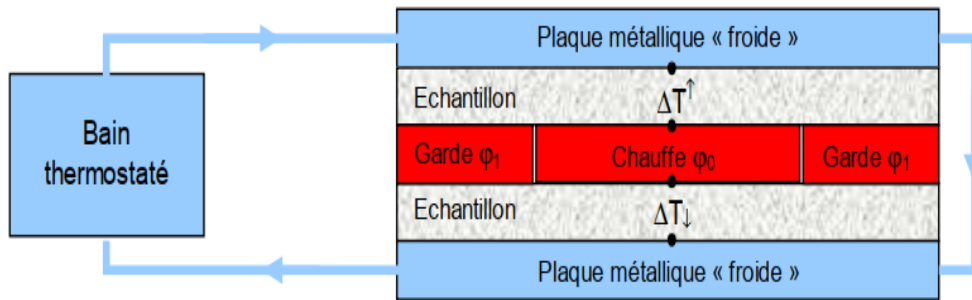


Fig. (7) : une explication détaillée du fonctionnement d'appareil [26]

Les plaques extérieures en matériau très conducteur (cuivre, aluminium) sont maintenues à température constante par circulation d'un fluide issu d'un bain thermostaté. Une plaque chauffante délivre une puissance de chauffe φ_0 uniforme et constante qui est transmise aux plaques extérieures à travers les échantillons dont on veut mesurer la conductivité thermique. On s'assure du transfert 1D dans la zone centrale de mesure en entourant la zone chauffée par un anneau de garde auquel on fournit un flux φ_1 tel que la température de l'anneau soit égale à la température de la plaque chauffante. On s'assure ainsi également que tout le flux φ_0 passe à travers l'échantillon. Le flux φ_1 est supérieur au flux φ_0 pour compenser les pertes latérales convectives. L'anneau de garde et la plaque chauffante sont séparés par une mince couche d'air.

Des thermocouples sont placés sur les deux faces des échantillons pour en mesurer les écarts de température ΔT_{\downarrow} et ΔT_{\uparrow} .

La conductivité thermique s'en déduit par :

$$\lambda = \frac{e \varphi_0}{S(\Delta T_{\downarrow} + \Delta T_{\uparrow})}$$

Où S : est la surface de la plaque chauffante [26]

Références :

- [1] **J.M. Berthelot**, Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures, (1999).
- [2] **R. Kueny**, Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles, thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, (2013).
- [3] **M. Lrekbi**, Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux Composites, Thèse Doctorat, université de Biskra (2016)
- [4] **K.ROUAM**, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire De Magister l'université mhamed bougara – boumerdes ; (2014).
- [5] **J.M. Berthelot**, « Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures » Livre, éditions : Lavoisier, (2005).
- [6] **G.Belhi**, étude du délaminage en mode des matériaux composites stratifiés par la méthode des éléments finis. Masters theses, Université Mohamed Khider - Biskra(2005).
- [7] **S. Swier, G. Van Assche, et B. Van Mele**, "Reaction kinetics modeling and thermal properties of epoxy–amines as measured by modulated-temperature DSC.I. Linear step-growth polymerization of DGEBA+ aniline," Journal of Applied Polymer Science, vol. 91, pp. 2798-2813, (2004).
- [8] **L.Gornet**, Généralités sur les matériaux composites. Document pédagogique, École centrale d'ingénieur Nantes France, (2008).
- [9] **Y. bouhadjila**, traitement fibres de palmier dattier : influence sur les propriétés des composites fibres, Mémoire de master(2019).
- [10] **L. Gendre**, Les grandes familles de matériaux composites, Université de paris Saclay France, (2011).
- [11] **S. Amirou**, Etude et mise au point de composite à base de la matière fibreuse du palmier dattier Phoenix dactylifera L, thèse de doctorat, Université de Boumerdes, Algérie, (2015).
- [12] **T.djoudi**, Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à Base de fibres de palmier dattier. Thèse Doctorat Université de Biskra (2019)

- [13] **T. Cédric**, Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone/matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV. Thèse de Doctorat, École Nationale supérieure des Mines de Paris France, (2011).
- [14] **F. Lachaud**, délaminage de matériaux composites à fibres de carbone et à matrices organiques : étude numérique et expérimentale, suivi par émission acoustique. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier De Toulouse France, (1997).
- [15] **M. Dupeux**, Aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, (2004).
- [16] **T.djoudi**, Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à Base de fibres de palmier dattier. Thèse Doctorat Université de Biskra (2019)
- [17] **W.Toumi**, Optimisation de la configuration des tubes En matériaux composites sous pression Mémoire de master, Université de Biskra(2019).
- [18] **A .Chawki**, analyse des vibrations libres et forcées des plaques Sandwichs sous l'effet de la température, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, (2017).
- [19] <https://energiepluslesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/conductivite-thermique-des-materiaux/>
- [20]. **P. Munier**, Le palmier-dattier, Techniques agricoles et productions tropicales Ed, (1973).
- [21] **B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois**, Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood, Energy and Buildings, (2010).
- [22] **A. Branders and A. Evrard**, Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines," Guide d'aide de la conception, Cellule de recherche Architecture et Climat, Université Catholique de Louvain, Belgique, (2010).
- [23] **M. Tlijani**, Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio-isolants : valorisation des déchets de bois de palmier, thèse De doctorat, Université Paris Est, Présentée et soutenue publiquement le (6 décembre 2016).
- [24] **H.Khaldoune**, Modélisation numérique de comportement thermo physique de composite de mortier à base des fibres de palmier dattier, Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M[°]SILA, (2017).
- [25] **F. M. AL-Oqla, O. Y. Alothman, M. Jawaid, S. Sapuan, and M. Es-Saheb**, Processing and properties of date palm fibers and its composites, in Biomass and bioenergy: Springer, pp. 1-25.(2014).

[25] Isolation thermique Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire — Méthode de la plaque chaude gardée

[26] **Y. JANNOT** ,Teorie et pratique de la metrologie thermique nancy universite (Octobre 2011)

CHAPITRE III

Modélisation des capteurs

Sommaire :

| | |
|--|----|
| III.1 Rappel sur le transfert de chaleur | 48 |
| III.1.1 Conduction | 48 |
| III.1.2 Convection | 48 |
| III.1.2.1 La convection libre ou naturelle | 49 |
| III.1.2.2 La convection forcée | 49 |
| III.1.2.3 Calcule le coefficient d'échange par convection | 49 |
| III.1.2.3.1 En convection forcée | 49 |
| III.1.2.3.2 En convection naturelle | 49 |
| III.1.3 Le rayonnement | 49 |
| III.2 Le système énergétique solaire étudié | 51 |
| III.3 Modélisation de l'insolateur | 52 |
| III.3.1 Par une méthode directe | 53 |
| III.3.1.a Méthode globale | 53 |
| III.3.1.b Méthode par tranche « pas à pas » | 53 |
| III.4 Détermination de la température selon la direction de l'écoulement de l'air | 57 |
| III.5 Modélisation des coefficients d'échange thermique | 58 |
| III.5.1 Transfert conductif | 59 |
| III.5.2 Transfert radiatif | 59 |
| III.5.3 Transfert convectif | 60 |
| III.5.3.1 Transfert convectif dû au vent | 60 |
| III.5.3.2 Transferts convectifs dans le capteur | 60 |
| II.6 Puissance absorbée «P_n» | 61 |
| II.7 Calcul des pertes thermiques «Q_p» | 62 |
| II.8 Pertes à l'avant «U_f» | 63 |
| II.9 Pertes à l'arrière «U_b» | 63 |
| II.10 Algorithme de calcul des performances de l'insolateur plan a air | 64 |
| Références | 69 |

Liste de figure :

| | |
|---|----|
| Fig. (1) : Schémas d'un capteur plan à air. | 52 |
| Fig. (2) : Représentation schématique des transferts thermiques dans l'insolateur. | 56 |
| Fig. (3) : Schéma électrique relatif à une section de l'insolateur (un seul passage d'air) | 56 |
| Fig. (4) : Tranche fictive « δx » | 57 |
| Fig. (5) : Organigramme simplifié du programme principal [25]. | 68 |

Introduction :

Le capteur solaire thermique, est un échangeur de chaleur qui permet de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air ...). Cette énergie est ensuite utilisée dans diverses applications [1, 2], à savoir ; le chauffage, la réfrigération, le séchage, etc.

L'objectif principal de ce chapitre est la détermination, en particulier des performances thermiques des capteurs solaires utilisant différents matériaux composites comme isolants dans la partie arrière du capteur

III.1 Rappel sur le transfert de chaleur :

III.1.1 Conduction :

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :

La densité de flux est Proportionnelle au gradient de température

$$Q_{cd} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial X}$$

Q_{cd} : Le flux de chaleur par conduction (W).

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

λ : La conductivité thermique (W/m °C).

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m).

III.1.2 Convection :

Dans ce cas le transfert de chaleur s'effectue d'un fluide liquide ou gazeux à un corps solide (Par exemple entre l'air et une paroi). Les particules se trouvent en mouvement entre elles.

On distingue deux types de convection :

III.1.2.1 La convection libre ou naturelle :

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

III.1.2.2 La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de Température (pompe, ventilation ...).

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par Déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h_c S (T_P - T_\infty)$$

Q_{cv} : Le flux de chaleur par convection (W).

S : La surface de transmission de chaleur (m^2).

T_P : La température de surface de solide ($^{\circ}C$).

T_∞ : La température du fluide avant son contact avec le solide ($^{\circ}C$).

h_c : Le coefficient de transmission thermique par convection ($W/m^2 \text{ }^{\circ}C$)

III.1.2.3 Calcule le coefficient d'échange par convection :

III.1.2.3.1 En convection forcée :

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h_c par convection est Indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 Grandeurs suivantes :

U_m : vitesse moyenne du fluide

ρ : masse volumique du fluide

C_p : chaleur spécifique du fluide

μ : viscosité thermique du fluide

λ : conductivité thermique du fluide

D : dimension caractéristique de la surface d'échange

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$Nu = h_c \frac{D}{\lambda} \quad \text{Nombre de Nusselt}$$

$$Re = \frac{\rho D U_m}{\mu} \quad \text{Nombre de Reynolds}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad \text{nombre de Prandtl}$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques $Nu=f(Re,Pr)$ qui permettent de calculer h par :

$$h = Nu \frac{D}{\lambda}$$

Re : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

Pr : le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

Nu : le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

III.1.2.3.2 En convection naturelle :

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température.

La convection forcée est négligeable si $\frac{Gr}{Pr^2} > 100$

$$Nu = C (Gr Pr)^n$$

Convection laminaire $Gr Pr < 109 \Rightarrow n=1/4$

Convection turbulente $Gr Pr > 109 \Rightarrow n=1/3$

III.1.3 Le rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$Q_r = \varepsilon \sigma S (T_p^4 - T_\infty^4)$$

Q_r : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^{-2} \text{K}^{-2}$

T_p : Température de la surface.

T_∞ : Température du milieu environnant la surface.

S : Aire de la surface (m^2)

II.2 Le système énergétique solaire étudié :

Le système solaire étudié est un capteur séchoir sans stockage d'énergie. Ceci nous amène à considérer un capteur solaire plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la plaque inférieure placée sur l'isolant. Tout ceci est dans le but d'obtenir des températures moyennes suffisantes pour différentes applications.

Les paramètres influençant le fonctionnement du capteur sont de deux natures :

- paramètres intrinsèques : ce sont soit des caractéristiques propres au capteur, soit des caractéristiques du fluide caloporteur qui le traverse,
- paramètres extrinsèques : c'est l'ensemble des conditions climatiques dont dépend le fonctionnement du capteur. L'éclairement incident est séparé en un éclairement de longueur d'onde inférieure à $2,5 \mu\text{m}$ et un éclairement infrarouge de longueur d'onde supérieure à $2,5 \mu\text{m}$. Ceci permet de tenir compte du rayonnement du ciel lorsque le capteur est placé à l'extérieur ou de celui du local d'essais lors des essais avec simulateur solaire [4].

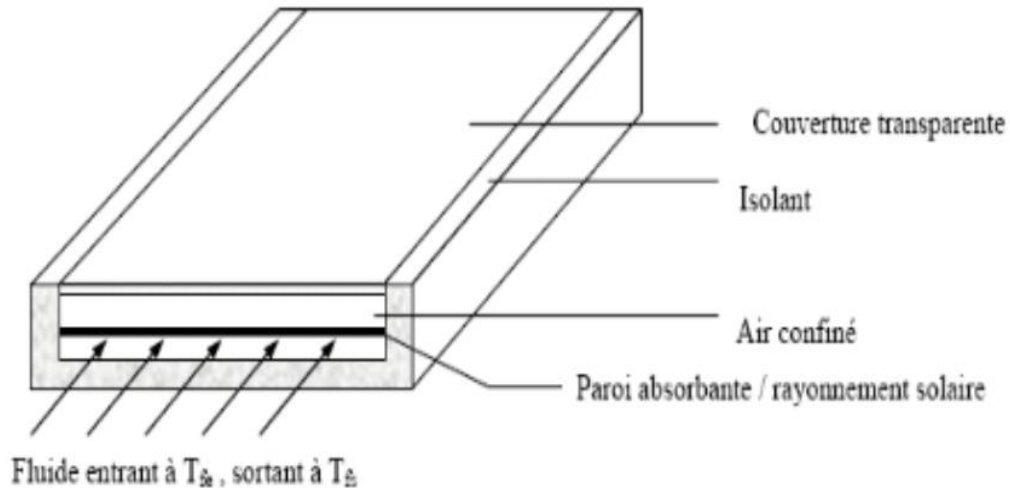


Fig. (1) : Schémas d'un capteur plan à air.

III.3 Modélisation de l'insolateur :

III.3.1 par une méthode directe :

Le bilan thermique d'un insolateur rapporté à l'unité de surface est :

$$G = Q_u + Q_p + Q_s \quad (1)$$

Ce bilan se résume ainsi : le flux global G reçu par l'insolateur représente la somme de l'énergie utile Q_u emportée par le fluide caloporteur, des déperditions thermiques Q_p par les différents modes de transfert vers le milieu ambiant et l'énergie stockée Q_s dans les différentes parties de l'insolateur.

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties de l'insolateur est négligeable, ce qui conduit à :

$$G = Q_u + Q_p \quad (2)$$

Le comportement du capteur a été modélisé en régime dynamique en utilisant une discrétisation nodale.

La modélisation du comportement thermique du capteur solaire en régime dynamique est faite par la discrétisation fictive en un certain nombre de pas. Les équations sont obtenues en écrivant les bilans énergétiques pour chaque nœud.

Il existe deux méthodes de modélisation de l'insolateur plan à air :

- a)- Méthode globale.
- b)- Méthode par tranches.

III.3.1.a Méthode globale :

Cette deuxième méthode est celle suivie par **Hottel**, **Whillier** et **Bliss** [5, 6]. Elle suppose que le régime est quasi-permanent et que les éléments de l'insolateur se trouvent chacun à une température moyenne constante ; elle néglige donc les effets de l'inertie thermique.

Cette méthode considère que la variation de la température à l'entrée du capteur est faible et les performances que nous déterminons sont instantanées.

L'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur s'écrit [7, 8, 9] :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{v}_f \text{grad } T_f \right) = \text{div}(\vec{q}) + \sigma_T$$

Où q est le flux de conduction dans le fluide, σ_T l'amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire par unité de volume du fluide caloporteur de masse volumique ρ .

En régime permanent et en négligeant la conduction dans le fluide, il vient :

$$\rho C_p \vec{v}_f \text{grad } T_f = \sigma_T$$

Si l'écoulement s'effectue suivant la direction de l'écoulement (axe longitudinal \vec{x}) cette équation s'écrit :

$$\rho C_p v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = \sigma_T$$

Où :

$$\sigma_T = \frac{Q_u}{e}$$

En introduisant le coefficient global de perte thermique entre l'absorbeur et l'air extérieur U_L , la puissance utile apportée par l'air sortant de l'insolateur s'écrit :

$$P_u = A Q_u = A \left((\tau_v \alpha_n) G - U_L (T_n - T_a) \right) \quad (3)$$

Où A est la surface de captation.

Si le transfert était idéal, on aurait $T_f = T_n$, et on pourrait écrire :

$$P'_u = A \left((\tau_v \alpha_n) G - U_L (T_f - T_a) \right)$$

En fait, la condition $T_f = T_n$ n'est jamais satisfaite, on est donc amené à définir un coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur noté « F' », qui représente le rapport de la puissance utile à la puissance récupérée par l'insolateur lorsque la température de l'absorbeur est celle du fluide, ce coefficient s'écrit alors :

$$F' = \frac{(\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_n - T_a)}{(\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_f - T_a)}$$

Soit :

$$P_u = AF'((\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_f - T_a)) \quad (4)$$

En introduisant le débit massique \dot{m} , l'équation de la chaleur s'écrit :

$$\dot{m}C_p \frac{\partial T_f}{\partial x} = lF'((\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_f - T_a))$$

Si l'on suppose que F' et U_L ne dépendent pas de x , la solution est de la forme :

$$\frac{T_f - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n)G}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n)G}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L l F' x}{\dot{m} C_p}\right)$$

La température T_{fs} du fluide à la sortie de l'insolateur de longueur L est donc telle que :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n)G}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n)G}{U_L}} = \exp\left(-\frac{U_L l F' L}{\dot{m} C_p}\right)$$

En fait, l'équation (15) qui est fonction de F' qui est aussi fonction de T_f et T_n , dépend donc de ces deux températures. La première est une donnée du problème, alors que la seconde est une inconnue.

Il est pratique d'exprimer la puissance utile en termes de conditions d'entrée en définissant un autre coefficient global de transfert air-absorbeur par :

$$F_R = \frac{(\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_n - T_a)}{(\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_{fe} - T_a)}$$

La puissance Q_u récupérée par le fluide par m^2 d'insolateur est :

$$\begin{aligned}
 Q_u &= \frac{\dot{m}}{l.L} C_p (T_{fs} - T_{fe}) = \frac{\dot{m}}{l.L} C_p \left((T_{fs} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) G}{U_L}) - (T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) G}{U_L}) \right) \\
 &= \frac{\dot{m}}{l.L} C_p \left((T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) G}{U_L}) \exp(-\frac{l.L.F' U_L}{\dot{m}.C_p}) - (T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) G}{U_L}) \right) \\
 &= \frac{\dot{m}.C_p}{l.L.U_L} \left(1 - \exp(-\frac{l.L.F' U_L}{\dot{m}.C_p}) \right) \left(\frac{(\tau_v \alpha_n) G}{U_L} - U_L (T_{fe} - T_a) \right)
 \end{aligned}$$

$$Q_u = F_R ((\tau_v \alpha_n) G - U_L (T_{fe} - T_a)) \quad (5)$$

Avec :

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p}{l.L.U_L} \left(1 - \exp(-\frac{l.L.F' U_L}{\dot{m}.C_p}) \right) \quad (6)$$

Pour une surface A de l'insolateur, le coefficient F_R s'écrit :

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A U_L} \left(1 - \exp(-\frac{F' U_L A}{\dot{m} C_p}) \right) \quad (7)$$

II.3.1.b Méthode par tranche « pas à pas » :

La méthode de modélisation « pas à pas » consiste à découper le CSP en tranches fictives de longueur “ δx ” dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à écrire le bilan des échanges dans chaque tranche [7, 8].

Il est commode pour cela d'utiliser les analogies thermiques et électriques.

Le réseau électrique (Figure. II.3) correspondant à l'insolateur est représenté sur la figure II.2 démunie d'ailettes nous permis d'écrire :

Pour la vitre :

$$\alpha_v G + h_{rnv} (T_n - T_v) + \frac{h_{vnat}}{2} (T_n - T_v) = U_{t1} (T_v - T_a) \quad (8)$$

Pour l'absorbeur :

$$(\tau_v \alpha_n) G = h_{vnf} (T_n - T_f) + \frac{h_{vnat}}{2} (T_n - T_v) + h_{rnpl} (T_n - T_{pl}) + h_{rnv} (T_n - T_v) \quad (9)$$

Pour le fluide caloporteur :

$$h_{vnf}(T_n - T_f) = h_{vPl}(T_f - T_{Pl}) + Q_u \quad (10)$$

Pour la plaque inférieure :

$$h_{vPl}(T_f - T_{Pl}) + h_{mPl}(T_n - T_{Pl}) = U_b(T_{Pl} - T_a) \quad (11)$$

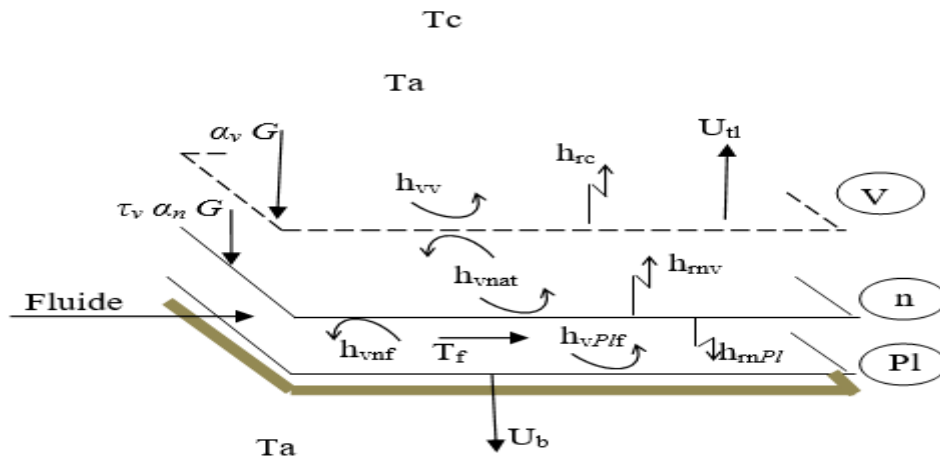


Fig. (2) : Représentation schématique des transferts thermiques dans l'insolateur.

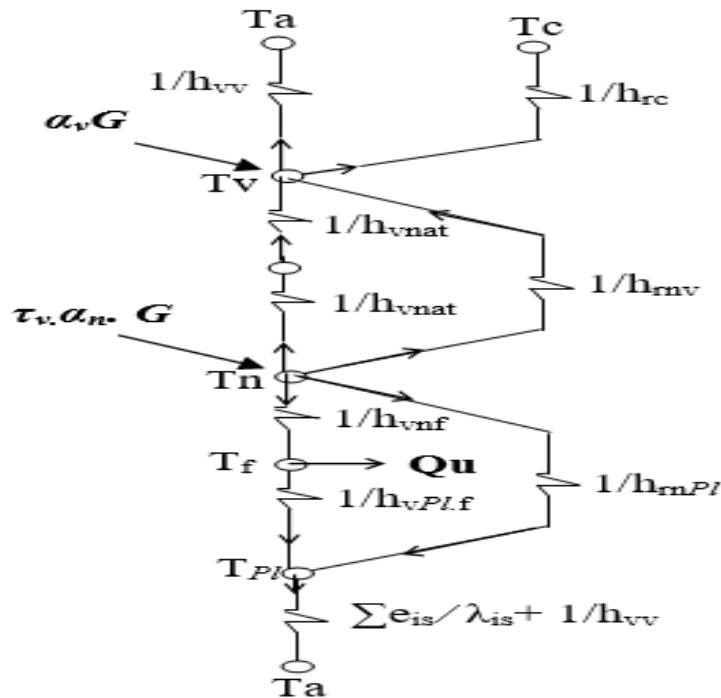


Fig. (3) : Schéma électrique relatif à une section de l'insolateur (un seul passage d'air)

III.4 Détermination de la température selon la direction de l'écoulement de l'air :

On considère la tranche « δx » voir (Figure. II.4). La température de l'air est supposée uniforme au niveau de la section de la veine mobile de l'insolateur démunie d'ailettes.

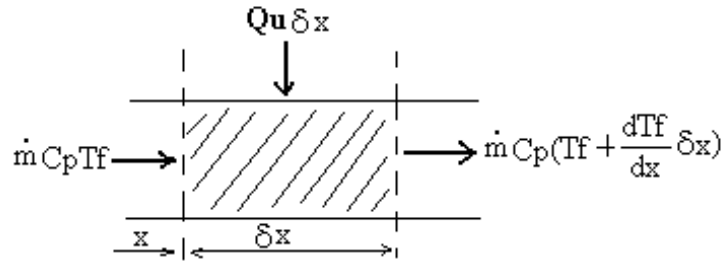


Fig. (4) : Tranche fictive « δx »

La conservation de l'énergie dans cette tranche nous donne (l est la largeur du capteur) :

$$\dot{m} C_p T_f + Q_u l \delta x = \dot{m} C_p (T_f + \frac{dT_f}{dx} \delta x) \quad (12)$$

Après simplification, on obtient :

$$\frac{dT_f}{dx} = \frac{Q_u l}{\dot{m} C_p} \quad (13)$$

Nous supposons, comme on le fait généralement, que le transfert de chaleur avec le fluide (air) de température T_f est uniforme le long du capteur de longueur L . l'intégration de l'équation est donc triviale et l'on a :

$$T_f(x) = \frac{Q_u l}{\dot{m} C_p} x + T_{fe} \quad (14)$$

Où T_{fe} est la température d'entrée du capteur, et T_{fs} , la température de sortie a pour valeur :

$$T_{fs} = \frac{Q_u l L}{\dot{m} C_p} + T_{fe}$$

Supposons aussi que la température du fluide varie linéairement le long du capteur, la valeur moyenne de la température est égale donc à la moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie :

$$T_f = \frac{T_{fs} + T_{fe}}{2}$$

Des deux dernières équations, on déduit :

$$Q_u = \frac{2\dot{m}C_p(T_f - T_{fe})}{A}$$

Où : $A = l.L$

En remplaçant la valeur de la puissance utile dans le système d'équations du bilan, on aboutit aux équations suivantes :

$$\left(\frac{h_{vnat}}{2} + h_{mv} + U_{t1}\right) T_v - \left(\frac{h_{vnat}}{2} + h_{mv}\right) T_n = \alpha_v I_g + U_{t1} T_a \quad (15)$$

$$-\left(h_{mv} + \frac{h_{vnat}}{2}\right) T_v + \left(\frac{h_{vnat}}{2} + h_{vnf} + h_{mv} + h_{mPl}\right) T_n - h_{vnf} T_f - h_{mPl} T_{Pl} = (\tau_v \alpha_n) I_g \quad (16)$$

$$h_{vnf} T_n - \left(h_{vnf} + h_{vPlf} + \frac{2\dot{m}C_p}{A}\right) T_f + h_{vPlf} T_{Pl} = -\frac{2\dot{m}C_p}{A} T_{fe} \quad (17)$$

$$-h_{mPl} T_n - h_{vPlf} T_f + (h_{mPl} + U_b + h_{vPlf}) T_{Pl} = U_b T_a \quad (18)$$

Ce système d'équations peut être sous forme d'une équation matricielle de dimension 4 :

$$[A][T] = [B] \quad \text{où} \quad [T] = \begin{bmatrix} T_v \\ T_n \\ T_f \\ T_{Pl} \end{bmatrix}$$

Les températures sont déterminées par la matrice inverse [10, 11] : $[T] = [A]^{-1}[B]$

Tous ces calculs nécessitent la connaissance des valeurs des coefficients d'échange par convection, par rayonnement et par conduction, ainsi que les valeurs de U_{t1} et U_b qui sont formulées par :

$$U_{t1} = h_{vv} + h_{rc} \quad \text{et} \quad U_b = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{vv}}}$$

III.5. Modélisation des coefficients d'échange thermique :

En plus des hypothèses générales mentionnées pour la modélisation des capteurs utilisant la méthode globale, on pose les hypothèses particulières suivantes :

- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement est négligeable,
- Le vent extérieur est supposé de direction toujours parallèle aux faces du CSP,

- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est supposée très grande).

Pour déterminer les divers coefficients d'échange thermique "h", les relations suivantes sont utilisées, selon qu'il s'agit d'un transfert par conduction, rayonnement ou convection.

III.5.1 Transfert conductif :

Les coefficients de transfert conductif à travers l'isolant et le bois vers l'arrière de l'insolateur sont donnés par :

$$\frac{\lambda_{is}}{e_{is}} \quad \text{et} \quad \frac{\lambda_b}{e_b} \quad (19)$$

Où :

λ_{is} et λ_b sont respectivement les conductivités thermiques de l'isolant et du bois

et e_{is} et e_b sont respectivement les épaisseurs de l'isolant et du bois

III.5.2 Transfert radiatif :

On considère un transfert radiatif entre deux plaques parallèles de températures T_1 et T_2 (exprimées en Kelvin). On applique la formule [12] :

$$h = \frac{\sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} - \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{S_1}{S_2}}$$

Où : T_1 et T_2 sont les températures absolues des deux faces, supposées uniformes,

ε_i est l'émissivité du milieu i (de surface S_i),

F_{12} est le facteur de forme géométrique entre les surfaces S_1 et S_2 , pris généralement pour les diverses parties de l'insolateur égale à 1,

σ est la constante de Stephan-Boltzmann.

➤ Entre la vitre et la voûte céleste

Rapporté par [10, 13], le coefficient d'échange radiatif s'écrit :

$$h_{rc} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_v (1 - \cos \beta) (T_v + T_c) (T_v^2 + T_c^2) \quad (20)$$

Où : β est l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale et les températures T_v et T_c sont les températures absolues.

T_c est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank (1963) :

$$T_c = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (21)$$

Les températures T_c et T_a sont exprimées en Kelvin.

➤ Entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{mv} = \frac{\sigma (T_v + T_n) (T_v^2 + T_n^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{nmat}} - 1} \quad (22)$$

Les températures T_v et T_n sont exprimées en Kelvin.

➤ Entre l'absorbeur et la plaque inférieure placée sur l'isolant

$$h_{mPl} = \frac{\sigma (T_n + T_{Al}) (T_n^2 + T_{Al}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{nAl}} + \frac{1}{\varepsilon_{Al}} - 1} \quad (23)$$

Les températures T_n et T_{Pl} sont exprimées en Kelvin.

III.5.3 Transfert convectif :

On distingue deux types d'échanges convectifs :

- Ceux dus au vent
- Ceux intervenant dans l'insolateur

III.5.3.1 Transfert convectif dû au vent :

La relation suivante de Hottel et Woertz est généralement admise [5, 14] :

$$h_{vV} = 5,67 + 3,86 \cdot v_v \quad (24)$$

Où : v_v est la vitesse du vent en (m/s).

III.5.3.2 Transferts convectifs dans le capteur :

- **Entre l'absorbeur et la vitre**

Le coefficient de pertes par conduction-convection naturelle, entre l'absorbeur et la vitre, rapporté dans [15] s'écrit :

$$h_{vnat} = 1,42 \left(\frac{(T_n - T_a) \sin \beta}{L} \right)^{1/4} \quad (25)$$

Les températures T_n et T_a sont exprimées en Kelvin.

- **Dans la veine d'air mobile**

Différents modèles sont utilisés dans la littérature pour le calcul du coefficient de transfert convectif et le nombre de Nusselt. Parmi ces modèles, on peut citer celui de T.Letz [3] permettant de calculer le coefficient de transfert convectif en utilisant une corrélation valable pour un canal lisse et en la multipliant par un coefficient de correction constant [16].

La corrélation de Parker [17] valable pour un capteur sans chicanes donnée en fonction des valeurs du nombre de Reynolds:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.344 \cdot \text{Re}^{0,35} & 100 < \text{Re} < 2100 \\ \text{Nu} &= 1.68 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Re}^{2,25} & 2100 < \text{Re} < 2850 \\ \text{Nu} &= 2.55 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re}^{1,04} & 2850 < \text{Re} < 5650 \\ \text{Nu} &= 19.8 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re}^{0,8} & 5650 < \text{Re} < 100.000 \end{aligned}$$

La corrélation de Kays permis le calcul du nombre de Nusselt à partir de la relation suivante [18, 16] :

$$N_u = 0,0158 R_e^{0,8} \quad \text{Pour } L/D_H > 10$$

III.6. Puissance absorbée « P_n » :

La puissance incidente I_g reçue par un mètre carré de surface d'insolateur incliné d'un angle β peut être déterminée théoriquement, elle s'écrit :

$$G = \phi_{b\beta} + \phi_{d\beta}$$

Où :

$\phi_{b\beta}$ est la composante directe,

$\phi_{d\beta}$ est la composante diffuse.

La puissance transmise à travers le vitrage est donc égale à $(\phi_{b\beta}\tau + \phi_{d\beta}\tau_d)$ en désignant par τ la transmittivité totale directionnelle et τ_d la transmittivité totale hémisphérique. L'absorbeur capte la fraction α_n de cette puissance transmise, et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_n)$. Si r_{vd} est la réflectibilité hémisphérique du vitrage, celui-ci réfléchit vers l'absorbeur la fraction $(1 - \alpha_n) \cdot r_{vd}$. Ce dernier absorbe à nouveau la fraction $\alpha_n \cdot (1 - \alpha_n) \cdot r_{vd}$ et réfléchit vers le vitrage la

fraction $(1 - \alpha_n)^2 \cdot r_{vd}$. La fraction $(1 - \alpha_n)^2 \cdot r_{vd}^2$ est, à nouveau, réfléchie vers l'absorbeur et ainsi de suite.

Après p réflexions sur le vitrage, la fraction réfléchie vers l'absorbeur est $(1 - \alpha_n)^p \cdot r_{vd}^p$ de sorte qu'après une infinité de réflexions, la puissance captée est :

$$\phi_n = \sum_{p=0}^{\infty} (1 - \alpha_n)^p r_{vd}^p (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d) = \frac{\alpha_n (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_n) r_{vd}} \quad (27)$$

Le rendement optique η_0 de l'insolateur défini par le quotient ϕ_n/G , également appelé 'transmittivité-absorptivité effective' de l'insolateur et noté $(\tau_v \alpha_n)$ vaut donc :

$$\eta_0 = \tau_v \alpha_n = \frac{\alpha_n (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)}{(1 - (1 - \alpha_n) r_{vd}) (\phi_{b\beta} + \phi_{d\beta})} \quad (28)$$

Pour la suite, on se limitera à déterminer la puissance ϕ_n par m^2 de surface de captation de l'insolateur en utilisant la formule suivante :

$$\phi_n = (\tau_v \alpha_n) G \quad (29)$$

III.7. Calcul des pertes thermiques « Q_p » [9, 19] :

Supposons que :

- Le régime est permanent,
- La puissance Q_{uv} absorbée par la vitre est négligeable,
- Les températures de l'absorbeur et de la plaque inférieure sont confondues.

Ces hypothèses nous permettent d'exprimer les pertes globales de l'absorbeur Q_p par m^2 de surface de captation de l'insolateur à l'aide du coefficient de pertes U_L et l'inverse est la résistance au transfert thermique entre les potentiels T_n et T_a :

$$Q_p = U_L (T_n - T_a) = Q_{p1} + Q_{p2} \quad (30)$$

Si les pertes latérales sont négligeables, Q_{p1} désignera les pertes à l'avant et Q_{p2} , les pertes à l'arrière.

III.8 Pertes à l'avant « U_t » :

Afin de déterminer le coefficient de pertes à l'avant U_t qui dépend de plusieurs paramètres, parmi eux le nombre et l'épaisseur de la couverture transparente, la formule suivante [20],

exprime les pertes à l'avant Q_{p1} en fonction de la température de l'absorbeur, indépendamment de celle de la vitre :

$$Q_{p1} = \frac{T_n - T_a}{N \left[\left(\frac{C}{T_n} \right) \left(\frac{T_n - T_a}{N + f} \right)^{0,33} \right] + \frac{1}{h_{vv}}} + \frac{\sigma (T_n^4 - T_a^4)}{\frac{1}{\epsilon_{n\beta} + 0,05N(1 - \epsilon_{n\beta})} + \frac{2N + f - 1}{\epsilon_{v\beta}} - N} \quad (31)$$

Les températures T_n et T_a sont exprimées en Kelvin.

Cette équation est valable pour :

$$\begin{aligned} 47^\circ\text{C} < T_n < 147^\circ\text{C}, & \quad -13^\circ\text{C} < T_a < 37^\circ\text{C}, & \quad 0,1 < \epsilon_{vb} < 0,95, \\ v_v < 10 \text{ m/s}, & \quad 1 \leq N < 3 & \quad \text{et} \quad 0 < \beta < 90^\circ \end{aligned}$$

Où :

N : est le nombre de vitrages

$\epsilon_{n\beta}$: est l'émissivité de l'absorbeur pour une inclinaison β de celui-ci,

$\epsilon_{v\beta}$: est l'émissivité de la vitre pour une inclinaison β de l'insolateur,

F : est le facteur correctif tenant compte de l'effet du vent, il s'exprime par :

$$f = (1 - 0,04 \cdot h_{vv} + 0,0005 \cdot h_{vv}^2)(1 + 0,091 \cdot N) \quad (32)$$

C : est le facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'insolateur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles, il est exprimé par :

$$C = 365,9(1 - 0,00883\beta + 0,00012\beta^2) \quad (33)$$

β étant exprimée en degrés

Finalement, les pertes U_t sont données par :

$$U_t = \frac{Q_{p1}}{T_n - T_a} \quad (34)$$

III.9 Pertes à l'arrière « U_b » :

L'expression des pertes de la face arrière de l'insolateur est :

$$U_b = \frac{1}{\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{1}{h_{vv}}} \quad (35)$$

Où : h_{vv} est le coefficient d'échange convectif dû au vent, entre la face inférieure de l'insolateur et l'air extérieur.

III.10 Algorithme de calcul des performances de l'insolateur plan a air :

Les différentes étapes de l'algorithme de calcul des performances thermiques de l'insolateur sont représentées sur la figure II.6. En utilisant la méthode globale de **Hottel, Whillier et Bliss**.

Les étapes de calcul sont les suivantes :

Introduction des données

- Dimensions de l'insolateur (largeur, longueur, inclinaison, etc.),
- Caractéristiques des ailettes, si utile,
- Données météorologiques, G , T_a , v_v ,
- Débit massique du fluide caloporteur \dot{m} ,
- Température d'entrée du fluide T_{fe} .

1. Initialisation des températures moyennes

- T_f du fluide dans l'insolateur,
- T_n de l'absorbeur,
- $T_{p\ell}$ de la plaque inférieure placée sur l'isolant,
- T_v de la vitre.

2. **Calcul du coefficient de transfert convectif h_{vv} dû au vent, voir équation (24)**
3. **Calcul du coefficient de transfert convectif h_{vnf} dans le conduit utile entre le fluide et l'absorbeur, voir équation (26)**
4. **Calcul du coefficient de pertes par conduction-convection naturelle h_{vnat} entre l'absorbeur et la vitre, voir équation (25)**
5. **Calcul des coefficients de transfert radiatif h_{rc} , h_{rnv} et h_{rnpl} par les formules respectives (20), (22) et (23)**
6. **Calcul des pertes U_t de la face avant de l'insolateur utilisant la corrélation de Klein (31) et l'équation (34)**

7. **Calcul des pertes U_b** de la face inférieure de l'insolateur utilisant la relation (35)

8. **Calcul du coefficient U_L** des pertes totales de l'insolateur, tenant compte des échanges radiatifs [21], il s'écrit :

$$U_L = \frac{(U_t + U_b)(h_{vnf} h_{vPff} + h_{vnf} h_{mPl} + h_{vPff} h_{mPl}) + U_b U_t (h_{vnf} + h_{vPff})}{h_{vnf} h_{mPl} + h_{vPff} U_t + h_{vPff} h_{mPl} + h_{vnf} h_{vPff}}$$

Sachant que : $h_{vPff} = h_{vnf}$, il vient alors :

$$U_L = \frac{(U_t + U_b)(h_{vnf} + 2h_{mPl}) + 2U_b U_t}{U_t + 2h_{mPl} + h_{vnf}} \quad (36)$$

- Si le capteur sans ailettes, ne contient pas la plaque inférieure placée sur l'isolant dans la veine d'air mobile, on ne tient pas compte des échanges radiatifs et on peut écrire :

$$U_L = U_t + U_b \quad (37)$$

9. **Calcul du coefficient d'efficacité F'** tenant compte des échanges radiatifs [22] :

$$F' = \frac{h_{mPl} h_{vnf} + h_{vPff} U_t + h_{vPff} h_{mPl} + h_{vnf} h_{vPff}}{(U_t + h_{mPl} + h_{vnf})(U_b + h_{vPff} + h_{mPl}) - h_{mPl}^2}$$

Pour : $h_{vPff} = h_{vnf}$, on aboutit à :

$$F' = \frac{h_{vnf}(U_t + 2h_{mPl} + h_{vnf})}{(U_t + h_{mPl} + h_{vnf})(U_b + h_{vnf} + h_{mPl}) - h_{mPl}^2} \quad (38)$$

- Par contre, lorsque le capteur sans ailettes ne dispose pas de la plaque inférieure sur l'isolant, les échanges radiatifs étant négligés, le coefficient F' peut être calculé par l'expression suivante :

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_{vnf}}} \quad (39)$$

10. **Calcul du coefficient de correction F_R** , à l'aide de l'équation (7)

11. **Calcul de la puissance utile Q_u** fournie par l'insolateur à partir de la relation :

$$Q_u = F_R((\tau_v \alpha_n)G - U_L(T_{fe} - T_a)) \quad (40)$$

12. **Recalcul de la température moyenne du fluide T_f** avec la relation suivante due à Klein

$$T_f = T_{fe} + \frac{Q_u}{U_L F_R} \left(1 - \frac{F_R}{F'}\right) \quad (41)$$

Calcul de la température moyenne de la plaque inférieure T_{pl} , déduite des équations (46)

à (48) du bilan :

$$(\tau_v \alpha_n)G + U_t(T_a - T_n) + h_{rmpI}(T_{pl} - T_n) + h_{vnf}(T_f - T_n) = 0 \quad (42)$$

$$h_{vnf}(T_n - T_f) + h_{vPlf}(T_{pl} - T_f) = Q_u \quad (43)$$

$$U_b(T_a - T_{pl}) + h_{vPlf}(T_f - T_{pl}) + h_{rmpI}(T_n - T_{pl}) = 0 \quad (44)$$

Pour : $h_{vPlf} = h_{vnf}$, on aboutit à :

$$T_{pl} = T_f + \frac{h_{rmpI}(\tau_v \alpha_n)G - (T_f - T_a)(U_t U_b + U_b h_{vnf} + h_{rmpI}(U_t + U_b))}{(U_t + h_{rmpI} + h_{vnf})(U_b + h_{vnf} + h_{rmpI}) - h_{rmpI}^2} \quad (45)$$

Pour : $h_{vPlf} = h_{vnf}$, on aboutit à :

13. Recalcul de la température moyenne de l'absorbeur T_n , d'après le bilan énergétique,

- Capteur muni de plaque inférieure et sans ailettes : $T_n = 2T_f + \frac{Q_u}{h_{vnf}} - T_{pl}$ (46)

- Capteur sans plaque inférieure et sans ailettes [23] : $T_n = T_f + \frac{Q_u}{h_{vnf}}$ (47)

14. Calcul de la température moyenne de la vitre T_v , d'après le bilan énergétique, elle s'écrit :

$$T_v + 273 = \frac{\alpha_v G + (T_n + 273) + (h_{rmv} + \frac{h_{vnat}}{2})(T_a + 273)h_{vv} + (T_c + 273)h_{rc}}{h_{rmv} + \frac{h_{vnat}}{2} + h_{vv} + h_{rc}} \quad (48)$$

15. Comparer, la valeur initiale de T_n et celle calculée. Si l'écart est trop important, réitérer à partir de (3), sinon continuer.

16. Calcul de :

- la température du fluide à la sortie du capteur :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{AQ_u}{\dot{m} C_p} \quad (49)$$

- le rendement thermique de l'insolateur η :

Le rendement thermique de l'insolateur représente le rapport de la puissance utile à la puissance incidente :

$$\eta = \frac{Q_u}{G} = \frac{P_u}{A.G} \quad (50)$$

Il peut être aussi donné en fonction du rapport de la différence de température ($T_{fe} - T_a$) au flux global incident G :

$$\eta = \frac{P_u}{A.G} = F_R(\tau_v \alpha_n) - F_R U_L \frac{T_{fe} - T_a}{G} \quad (51)$$

Remarque :

A partir de cette étude théorique, nous avons développé un programme dans un environnement « Matlab » qui nous a permis de calculer les performances thermiques de l'insolateur plan à air. Ce programme a été élaboré pour la première fois par K. Aoues [24] dans son travail de Magister, puis développé pour l'optimisation des CSPs muni de différentes formes d'ailettes rectangulaires et munis d'une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant dans la veine d'air mobile par A. Labed [16]. Nous avons adapté ce programme afin de permettre d'introduire différentes valeurs de résistance thermique.

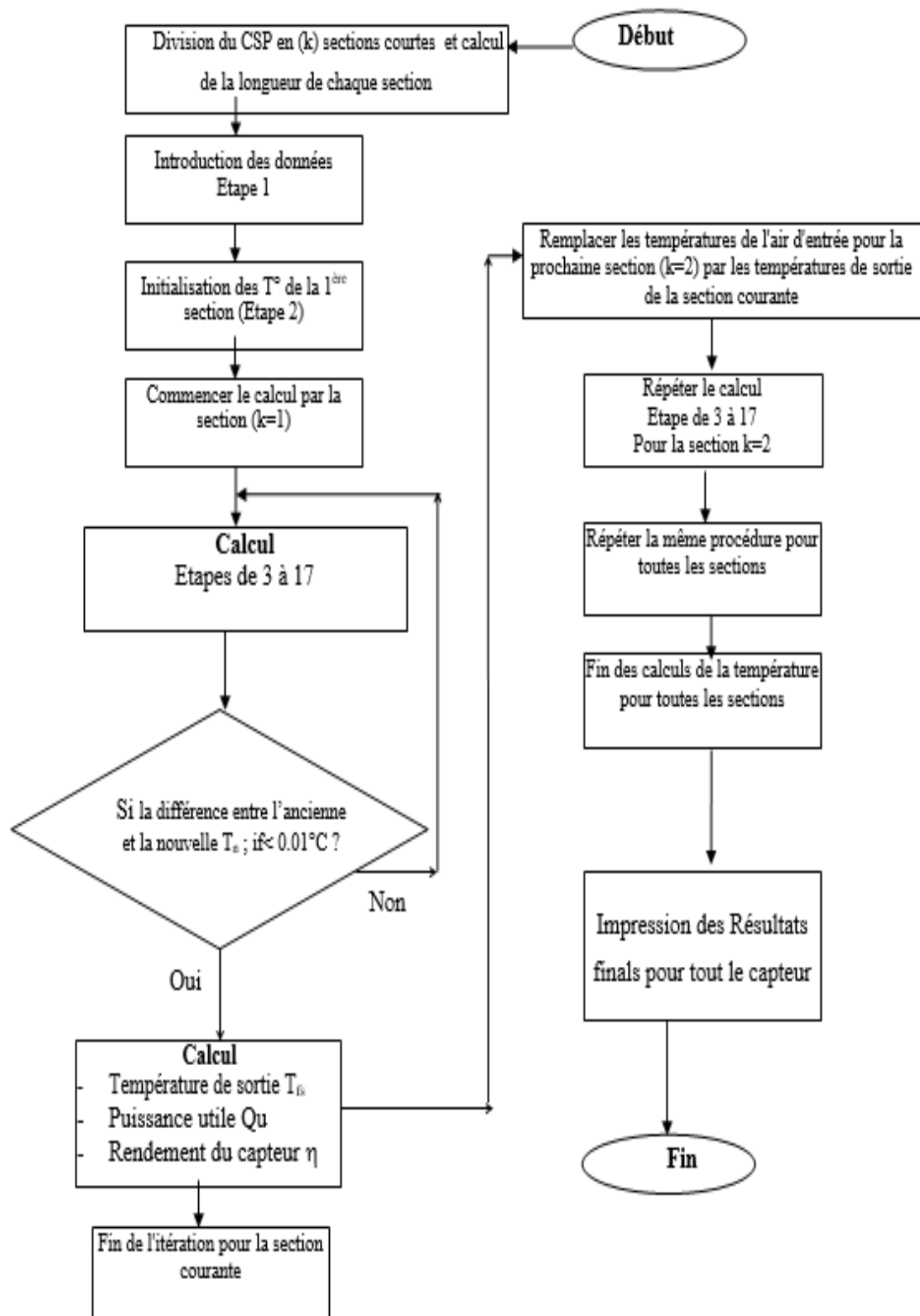


Fig. (5) : Organigramme simplifié du programme principal [25].

Références :

- [1] **S.Ouard**, Optimisation des formes et disposition d'obstacles dans la veine mobile du fluide des capteurs solaires plans à deux couches d'air en vue de la maximisation du couple rendement et température, Thèse de doctorat. Université de Valenciennes, France (1989).
- [2] **S. A. Klin**, Calculation of flat plat collectors loss coefficients, Solar Energy, 1975, Vol 17.
- [3] **T. Letz**, Modélisation et dimensionnement économique d'un système de chauffage domestique bi-énergie, Thèse doctorat, INSA Lyon, France (1985).
- [4] **J. A. Duffie**, Beckman D., Solar engineering of thermal processes, Jhon & Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA ed. 908 pp (2006).
- [5] **H. C. Hottel, Woertz B. B.** Performance of flat plate solar heat collectors. Transactions of the ASME 64: (1942) 91–104.
- [6] **A. Whillier**, Plastic covers for solar collectors, Solar Energy 7(3) : (1963) 148-1 5 1.
- [7] **A. A. Hegazy. (a)**, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. Energy Conversion and Management, 41: (2000) 861-881.
- [8] **A. A. Hegazy. (b)**, Performance of flat plate solar air heaters with optimum channel geometry for constant/variable flow operation. Energy Conversion and Management, 41: (2000) 401-417.
- [9] **S. Kalogirou**, The potential of solar industrial process heat applications. Applied Energy, 76 : (2003) 337-361.
- [10] **S. Youcef-Ali**, Étude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, thèse Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis France (2001).
- [11] **K. S. Ong**, Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure, Solar Energy 55: (1995) 93-109.
- [12] **J. F. Sacadura**, Initiation aux transferts thermiques, Cast, INSA de Lyon, Technique et Documentation de Paris (1980).
- [13] **A. Belghit, M. Belhamidi, A. Bennis, B. C. Boutaleb.** et **S. Benet**, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, Revue Générale de Thermique 36 : (1997) 837-850.
- [14] **W. H. Mc Adams**, Transmission de la chaleur, 2^{ème} éd, Dunod, Paris (1961).

- [15] **N. Moumni**. Prévisions systématiques et optimisation des performances des capteurs solaires plans à air dans divers sites de climats méditerranéens ou sahariens et avec ou sans altitude. PhD thesis. Université de Valenciennes, France (1994).
- [16] **A. Labeled**, Contribution à l'étude des échanges convectifs en régime transitoire dans les capteurs plans à air ; application au séchage des produits agroalimentaires. Thèse de doctorat, université de bisous, (2012).
- [17] **B.F. Parker**, Lindley M.R., Colliver D.G., Murphy W.E., Thermal performance of three solar air heaters. *Solar Energy* 51(6) : (1993) 467–79.
- [18] **M. Dagenet**, Les Séchoirs Solaires : Théorie et Pratique, Unesco (1985).
- [19] **A. Fudholi, K. Sopian, M. Ruslan, M. Alghoul, M. Sulaiman**, Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: (2010) 1-30.
- [20] **Beckman W. A., Klein S. A. et Duffie J. A.**, Solar Heating Design (by the f-chart method), A Wiley-Interscience publication (1977).
- [21] **T. Liu, W. Lin, W. Gao, C. Luo, M. Li, Q. Zheng, C. Xia.**; A parametric study on the thermal performance of a solar air collector with a v-groove absorber. *International Journal of Green Energy*, 4 : (2007) 601-622.
- [22] **A. Hachemi**, Contribution à l'optimisation des performances thermiques des insolateurs plan à air, à lit garni de rangées d'obstacles aux pas serrées. Amélioration du rendement par interaction entre le rayonnement et la convection, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France (1992).
- [23] **D. Njomo**, Étude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre, *Rev. Gén. Therm (Elsevier)*, 37 : (1998) 973-980.
- [24] **K. Aoues**, Modélisation thermique de l'écoulement de l'air entre deux plans parallèles, garnis de rugosités artificielles rectangulaires avec la partie supérieure inclinée, Mémoire de magistère (2005).

CHAPITRE IV

Résultats et interprétation

Sommaire :

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction | 74 |
| IV.2 La résistance thermique évolue en fonction de l'épaisseur des sandwichs | 74 |
| IV.3 Résistance thermique total d'un mur composite (en série) | 75 |
| IV.4 Calcul de la résistance thermique de chaque sandwich | 76 |
| IV.5 Résistances thermiques des différentes combinaisons | 77 |
| IV.6 Calcul des performances thermique d'un capteur solaire à air | 79 |
| IV.6.1 Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 1 | 79 |
| IV.6.2 Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 2 | 83 |
| IV.6.3 Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 3 | 88 |
| IV.6.4 Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 4 | 91 |
| IV.7 Conclusion | 94 |
| IV.8 Conclusion général | 95 |

Liste des Figures :

| | |
|---|----|
| Fig. (1) : La forme des sandwichs et leurs parties principales | 74 |
| Fig. (2) : Résistance d'un mur composite : schéma électrique équivalent | 75 |
| Fig. (3) : Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur du cœur ($e_{\text{peau}} = 3.5\text{mm}$) | 77 |
| Fig. (a) : Energie utile en fonction du débit | 79 |
| Fig. (b) : Température de sortie en fonction du débit | 80 |
| Fig. (c) : Rendement en fonction du débit | 81 |

Liste des Tableau :

| | |
|--|----|
| Tab. (1) : Conductivité thermique des différents matériaux utilisés. | 75 |
| Tab. (2) : Les composants des sandwichs étudiés (Cœur et Peaux) | 76 |
| Tab. (3) : Matériaux constitutifs des différents groupes de sandwichs étudiés | 77 |
| Tab. (4) : Conductivité équivalente et Résistance totale de chaque matériau | 78 |

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats d'une simulation numérique des performances thermiques d'un capteur solaire, utilisant différents matériaux composites dans la partie arrière comme isolants. Le but est de comparer la faisabilité de l'utilisation d'un matériau composite (sandwich) à base de déchets de palmier dattier comme cœur.

Nous avons considéré les différents matériaux comme murs multicouches, et nous avons calculé la résistivité thermique de chaque matériau, puis nous avons injecté les valeurs de la résistivité de chaque matériau dans un code de calcul (Matlab), dont le but de voir les performances thermiques acquises par l'utilisation de ces matériaux.

IV.2 La résistance thermique évolue en fonction de l'épaisseur des sandwichs :

Les sandwichs se composent principalement de deux parties principales les peaux et le Cœur (Ame).

La figure suivante montre La forme des sandwichs et leurs parties principales :

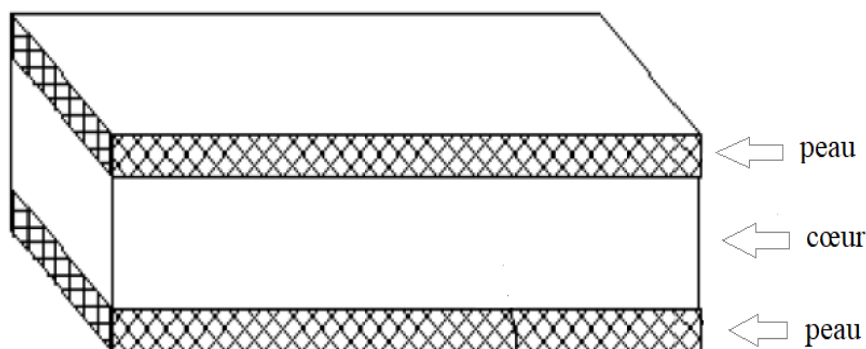


Fig. (1) : La forme des sandwichs et leurs parties principales

Les matériaux utilisés dans les sandwichs sont formés par deux différents matériaux : les peaux et les cœurs comme le montre le tableau suivant :

Tab. (1) : Conductivité thermique des différents matériaux utilisés.

| Peaux | Conductivité λ (W/mK.) | Cœurs | Conductivité λ (W/mK.) |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Contre-plaqué | 0.11 | Pétioles | 0.083 |
| Liège | 0.049 | Polystyrène | 0.042 |
| Papier recyclé | 0.021 | Fibres de verre | 0.050 |
| Fibres de verre | 0.05 | Papier recyclé | 0.021 |

IV.3 Résistance thermique total d'un mur composite (en série) :

Dans le cas des panneaux sandwich constitués de trois matériaux différents ou similaires, la conductivité thermique équivalente est calculée en calculant la résistance thermique de chaque matériau, qui se caractérise par :

Où e est l'épaisseur (mm) et λ est la Conductivité (W/m K.)

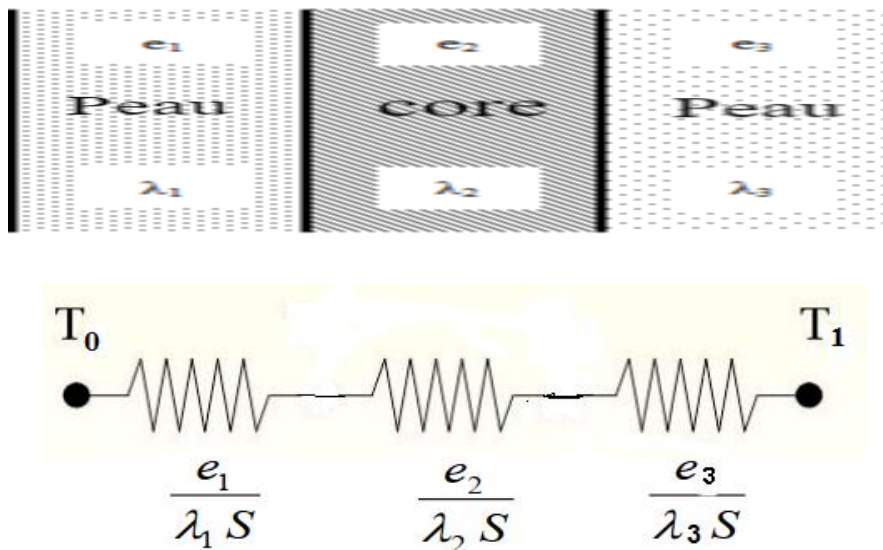


Fig. (2) : Résistance d'un mur composite : schéma électrique équivalent

$$\text{Avec } R_{tot} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} = R_{coure} + 2R_{peaux}$$

$\frac{e_1}{\lambda_1}$ La résistance du premier matériau (peaux (e_1, λ_1))

Chapitre IV : Résultats et interprétation

$\frac{e_2}{\lambda_2}$ La résistance du deuxième matériau (Cœur (e_2, λ_2))

$\frac{e_3}{\lambda_3}$ La résistance du troisième matériau (peaux (e_3, λ_3))

IV.4 Calcul de la résistance thermique de chaque sandwich :

Tout d'abord, nous avons étudié la variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur du cœur.

Nous notons ici que l'épaisseur du cœur varie de (5mm à 40 mm) et que l'épaisseur des peaux sera fixée à 3.5 mm

Nous avons utilisé quatre combinaisons de matériaux sandwiches, comme indiqué dans le tableau :

Tab. (2) : Les composants des sandwiches étudiés (Cœur et Peaux)

| | Sandwich 1 | Sandwich 2 | Sandwich 3 | Sandwich 4 |
|-------|---------------|------------|----------------|-----------------|
| Cœur | pétioles | pétioles | pétioles | pétioles |
| Peaux | Contre-plaque | liège | papier recyclé | Fibres de verre |

Les relations suivantes permettent de calculer la résistance thermique totale pour chaque sandwich séparément :

La résistance du cœur $R_{Coeur} = \frac{e_c}{\lambda_c}$

La résistance du Peau $R_{peau} = \frac{e_p}{\lambda_p}$

La résistance totale du sandwich $R_{total} = R_{Coeur} + 2R_{peau}$

Les résultats obtenus ont été compilés et illustrés dans La figure suivante :

Il s'avère d'après les courbes présentés sur la figure 5, que les valeurs de la résistance thermique du sandwich 3 sont plus élevés que les autres sandwiches, tandis que les valeurs de la résistivité thermique du sandwich 1 sont les plus faibles.

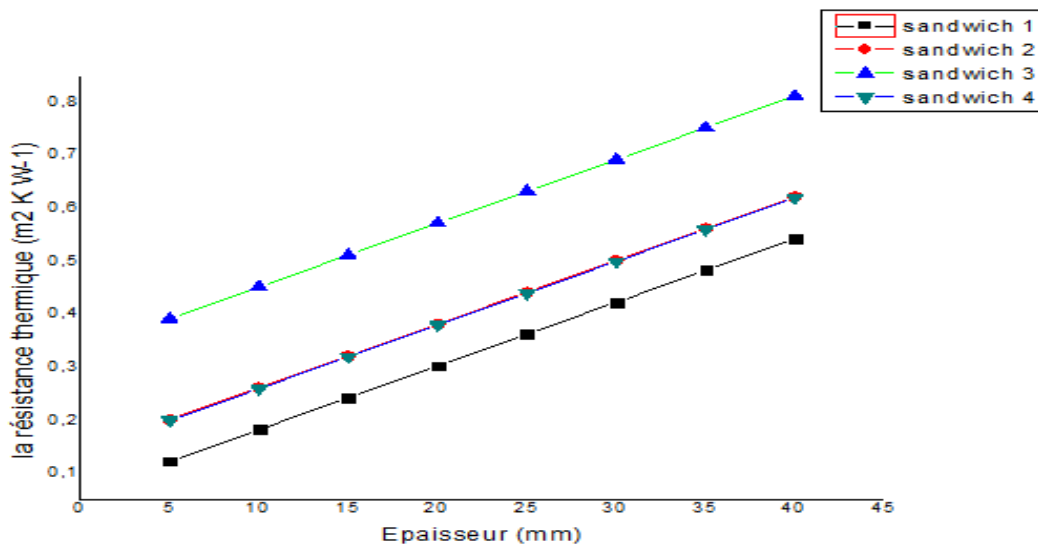


Fig. (3) : Variation de la résistance thermique en fonction de l'épaisseur du cœur (e peau =3.5mm)

IV.5 Résistances thermiques des différentes combinaisons :

La résistance thermique totale et la conductivité sont calculées après avoir observé les résultats précédents, ceci en fixant l'épaisseur de chaque peau 3.5mm et l'épaisseur du Cœur à 35mm, d'où l'épaisseur totale sera 42mm.

Dans le tableau suivant, nous présentons les composants de chaque sandwich et la valeur de la résistance thermique totale.

La combinaison des différents matériaux nous a permis d'étudier quatre groupes de sandwiches, chaque groupe est composé de matériaux différents :

Groupe 1 : Composé de pétiole comme cœur

Groupe 2 : Composé de polystyrène comme cœur

Groupe 3 : Composé de fibres de verre comme cœur

Groupe 4 : Composé de papier recyclé comme cœur

Tab. (3) : Matériaux constitutifs des différents groupes de sandwiches étudiés

| Groupe 1 | Sandwich 1 | Sandwich 2 | Sandwich 3 | Sandwich 4 |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Cœur | Pétioles | pétioles | pétioles | pétioles |
| Les Peaux | Contre-plaque | liège | Fibres de verre | papier recycle |
| Groupe 2 | Sandwich 1 | Sandwich 2 | Sandwich 3 | Sandwich 4 |
| Cœur | Polystyrène | Polystyrène | Polystyrène | Polystyrène |
| Les Peaux | Contre-plaque | liège | Fibres de verre | papier recyclé |

Chapitre IV : Résultats et interprétation

| Groupe 3 | Sandwich 1 | Sandwich 2 | Sandwich 3 |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Cœur | Fibres de verre | Fibres de verre | Fibres de verre |
| Les Peaux | Contre-plaque | liège | papier recyclé |
| Groupe 4 | Sandwich 1 | Sandwich 2 | Sandwich 3 |
| Cœur | Papier recycle | Papier recycle | Papier recycle |
| Les Peaux | Contre-plaque | Liège | Fibres de verre |

Conductivité thermique équivalente $[W.K^{-1}m^{-1}] = \frac{e_{total}}{R_{total}}$

Les valeurs calculées de la résistance et la conductivité thermique de chaque matériau sont présentés dans le tableau 6 :

Tab. (4) : Conductivité équivalente et Résistance totale de chaque matériau

| Les groupes | Les Sandwichs | Résistance total [$m^2K. W^{-1}$] | Conductivité équivalente [$W.K^{-1}m^{-1}$] |
|-------------|---------------|--|---|
| Groupe 1 | Sandwich 1 | 0.484 | 0.0867 |
| | Sandwich 2 | 0.563 | 0.0746 |
| | Sandwich 3 | 0.561 | 0.0748 |
| | Sandwich 4 | 0.753 | 0.0557 |
| Groupe 2 | Sandwich 1 | 0.896 | 0.0468 |
| | Sandwich 2 | 0.975 | 0.0430 |
| | Sandwich 3 | 0.973 | 0.0431 |
| | Sandwich 4 | 1.163 | 0.0361 |
| Groupe 3 | Sandwich 1 | 0.763 | 0.0550 |
| | Sandwich 2 | 0.842 | 0.0498 |
| | Sandwich 3 | 1.032 | 0.0406 |
| Groupe 4 | Sandwich 1 | 1.663 | 0.0252 |
| | Sandwich 2 | 1.742 | 0.0241 |

| | | | |
|--|------------|------|--------|
| | Sandwich 3 | 1.74 | 0.0241 |
|--|------------|------|--------|

IV-6 Calcul des performances thermique d'un capteur solaire à air :

Dans ce qui suit nous allons utiliser les caractéristiques thermiques calculés précédemment pour calculer les performances thermiques résultantes d'un capteur solaire plan à air. Pour cela, nous avons adapté un code de calcul (Matlab) qui a été élaboré par Dr. Aoues et développé par Pr. Labeled dans le cadre d'une thèse de doctorat. Nous avons ainsi, introduit les caractéristiques thermiques de chaque matériau composite dans la partie arrière du capteur comme matériaux isolant. L'objectif principale est de voir les applications possibles de chaque matériaux et surtout les matériaux à base de déchets de palmier dattier, vu leur disponibilité et abondance dans notre région.

IV-6-1 performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 1 :

Dans une première simulation nous avons introduit les propriétés thermiques du pétiole comme cœur et nous avons changé à chaque fois les peaux. Le code de calcul nous a permis de calculer la température de sortie du capteur, l'énergie utile récupérée et le rendement thermique en fonction du débit (Figs.1-4).

Sandwich 1 : Contre-plaque- pétioles- Contre-plaqué

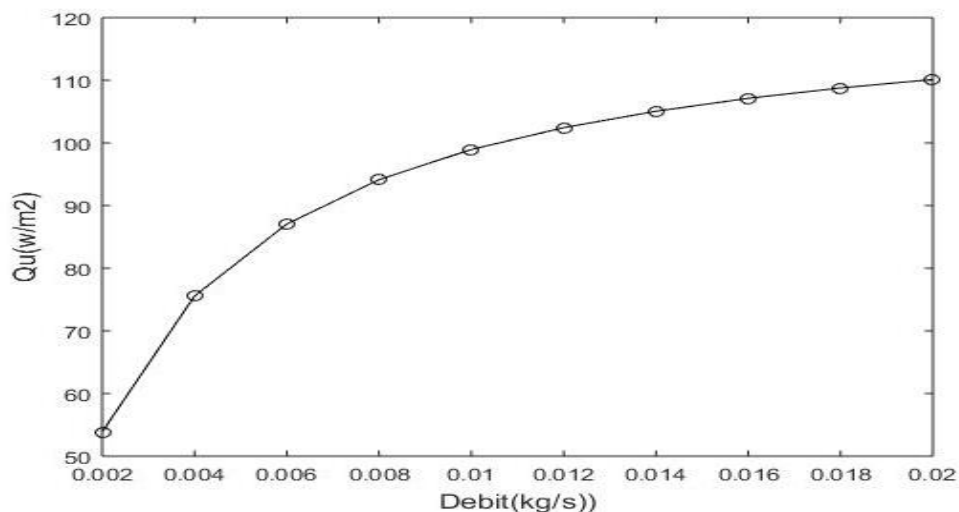


Fig. (1-a) : Energie utile en fonction du débit

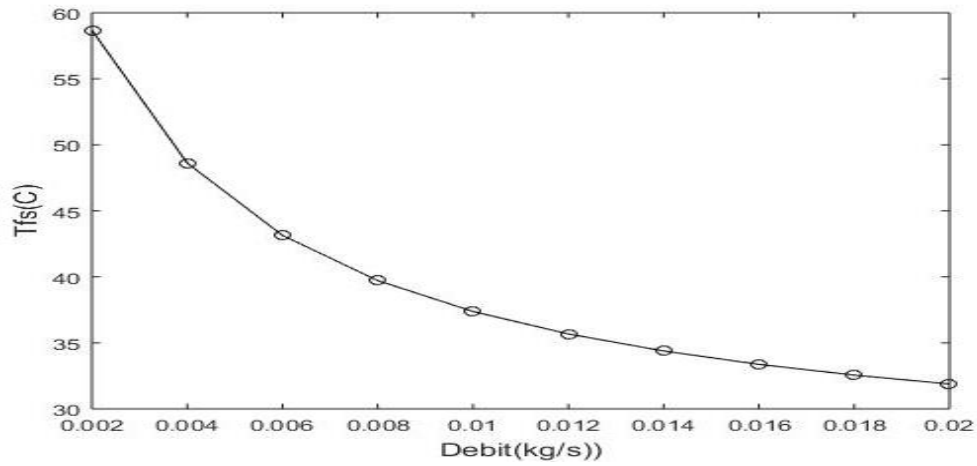


Fig. (1-b) : Température de sortie en fonction du débit

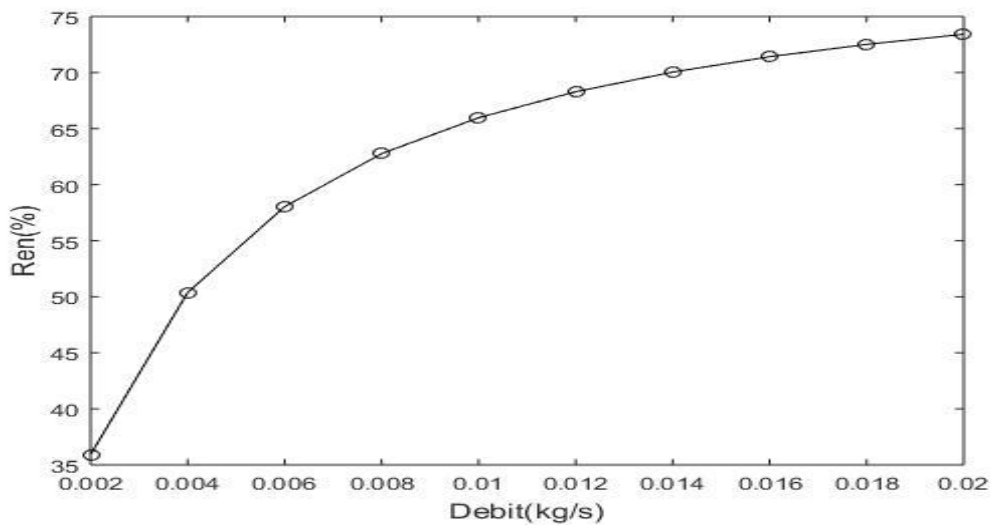


Fig. (1-c) : Rendement en fonction du débit

Sandwich 2 : liège - pétoles-liège

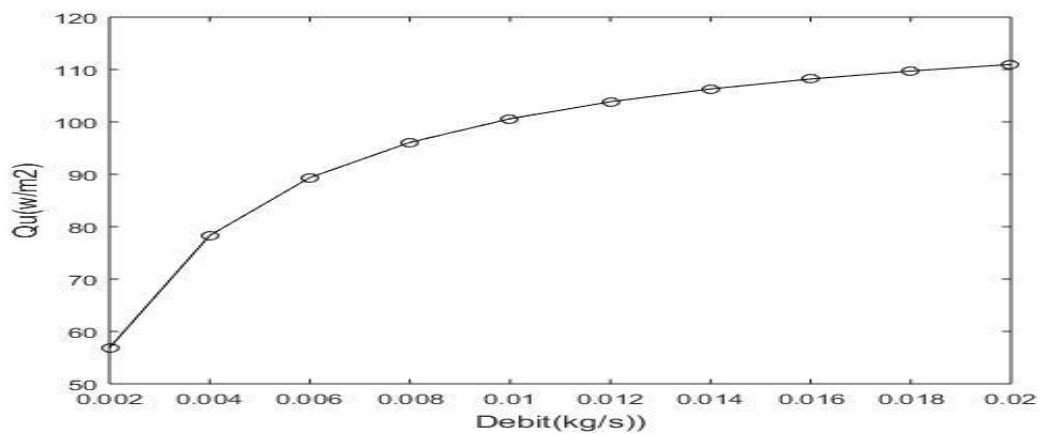


Fig. (2-a) : énergie utile en fonction du débit

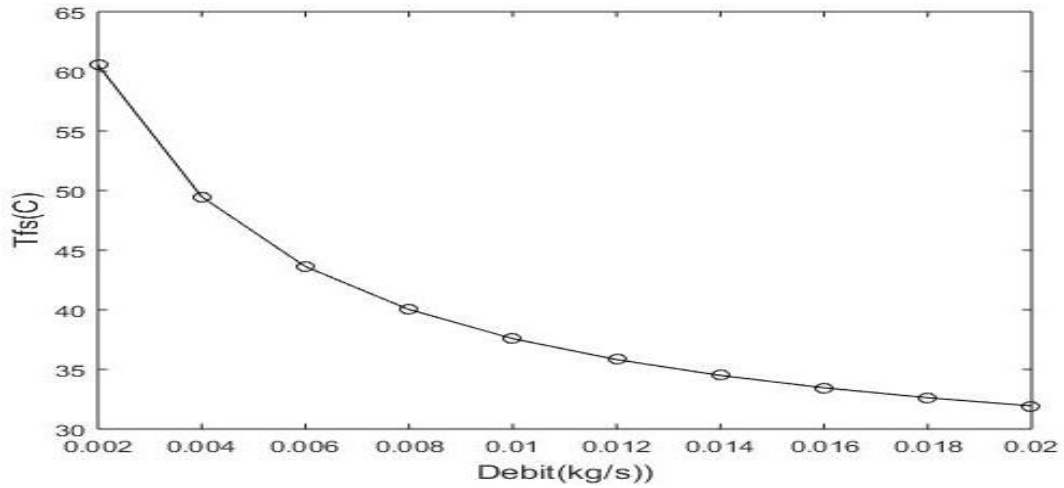


Fig. (2-b) : Température sortie en fonction du débit

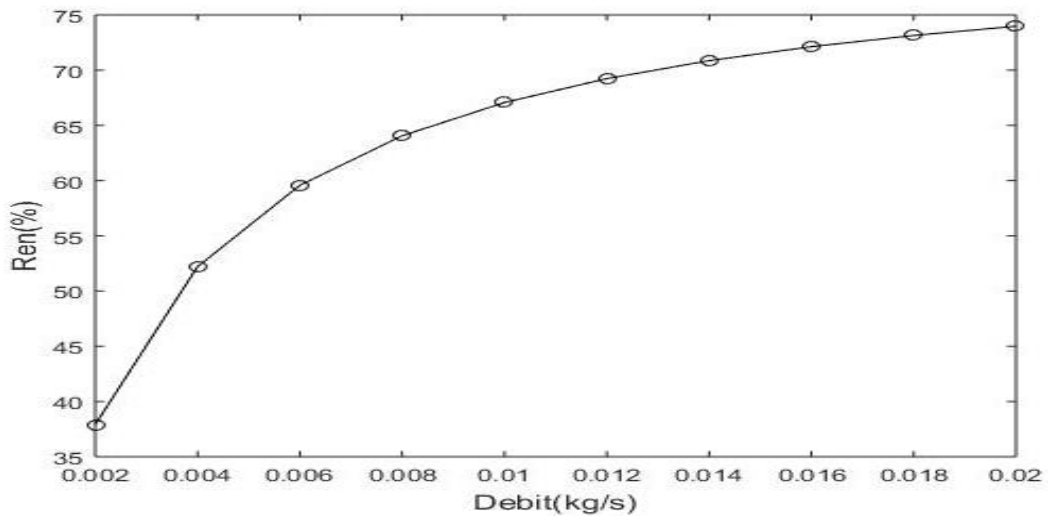


Fig. (2-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 3 : fibre de verre - pétioles–fibre de verre

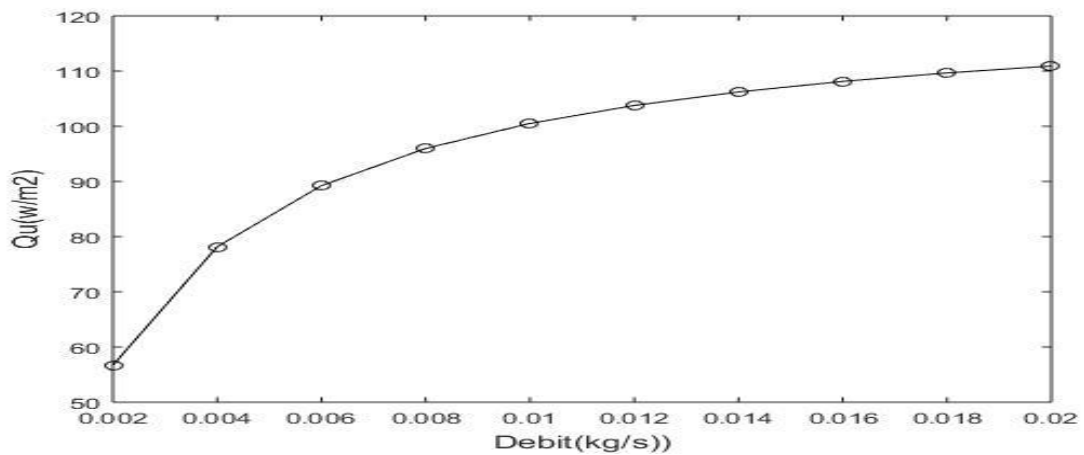


Fig.(3-a) : énergie utile en fonction du débit

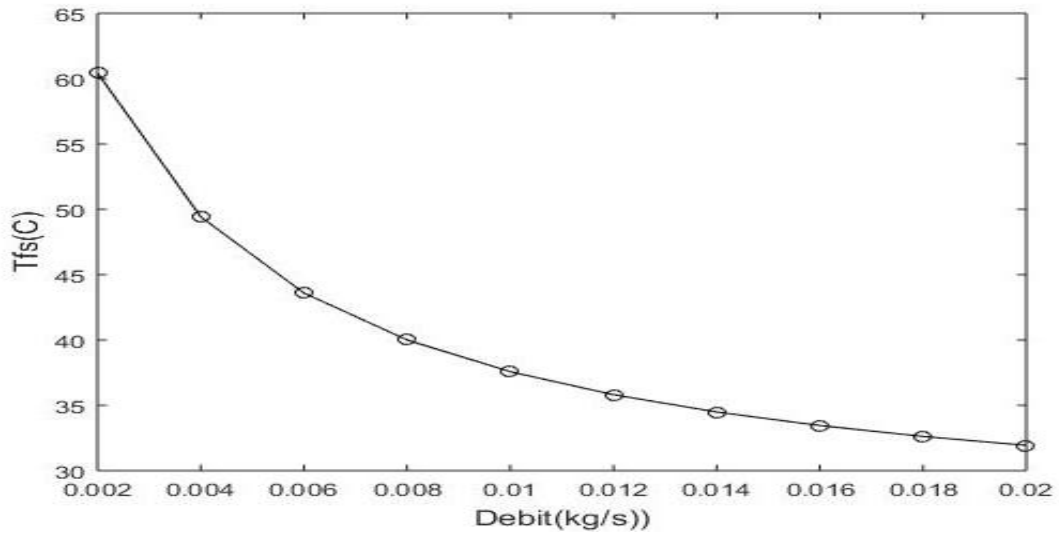


Fig. (3-b) : Température sortie en fonction du débit

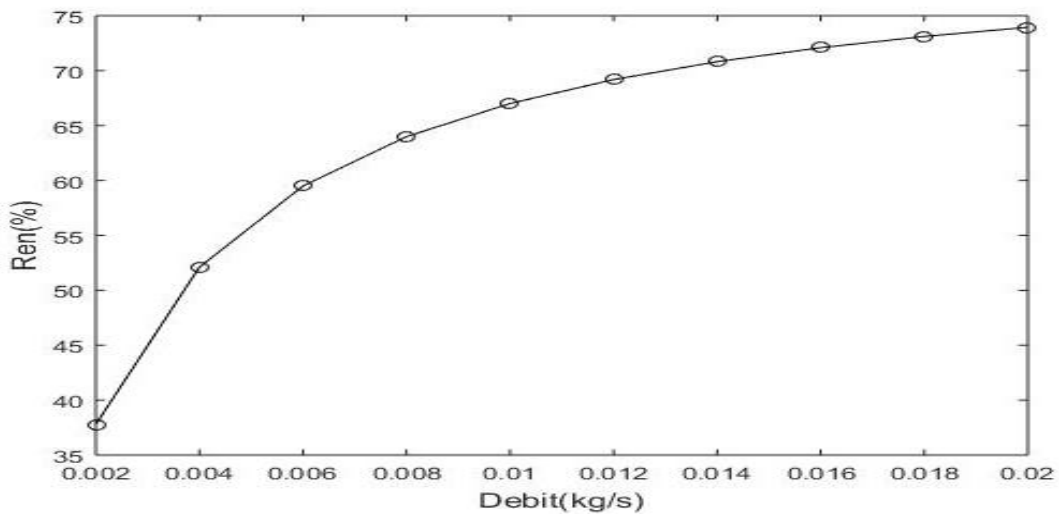


Fig. (3-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 4 : Papier recyclé - pétioles- papier recyclé

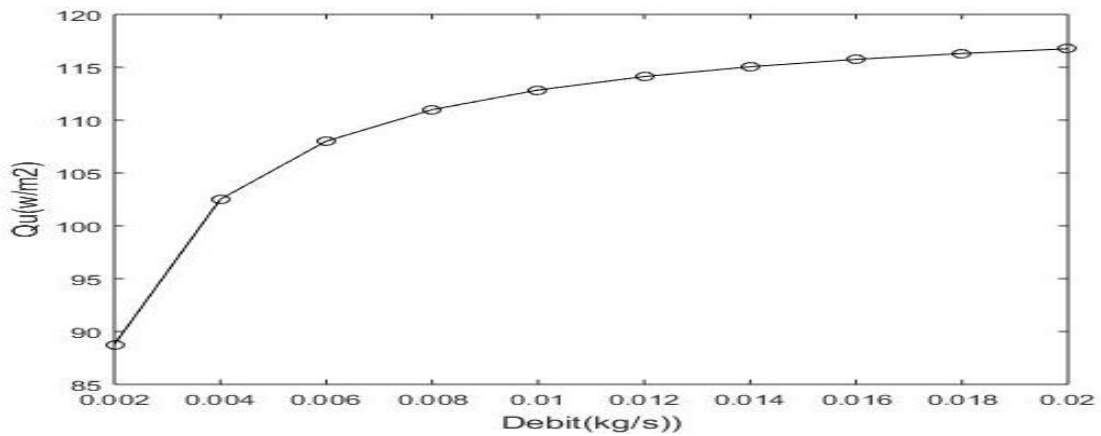


Fig. (4-a) : Energie utile en fonction du débit

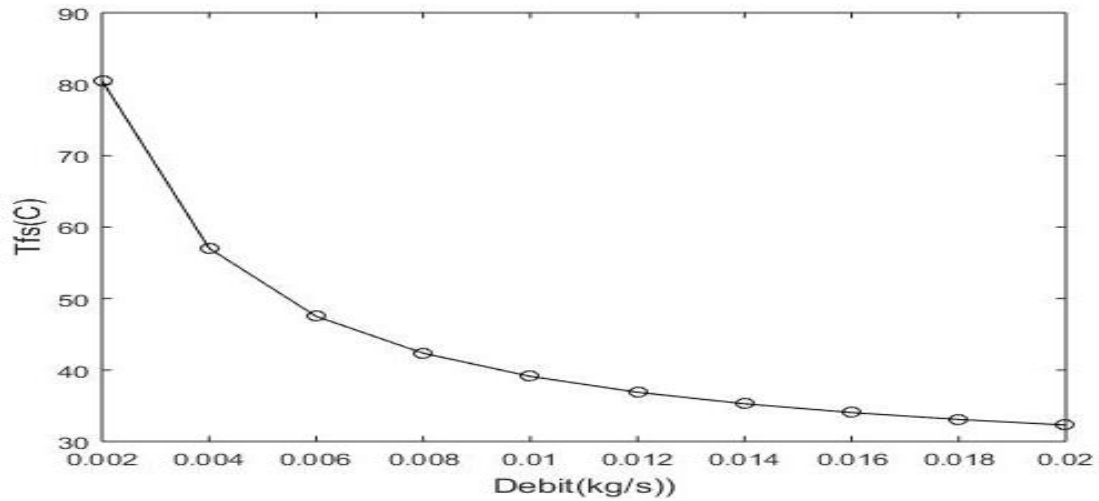


Fig. (4-b) : Température de sortie en fonction du débit

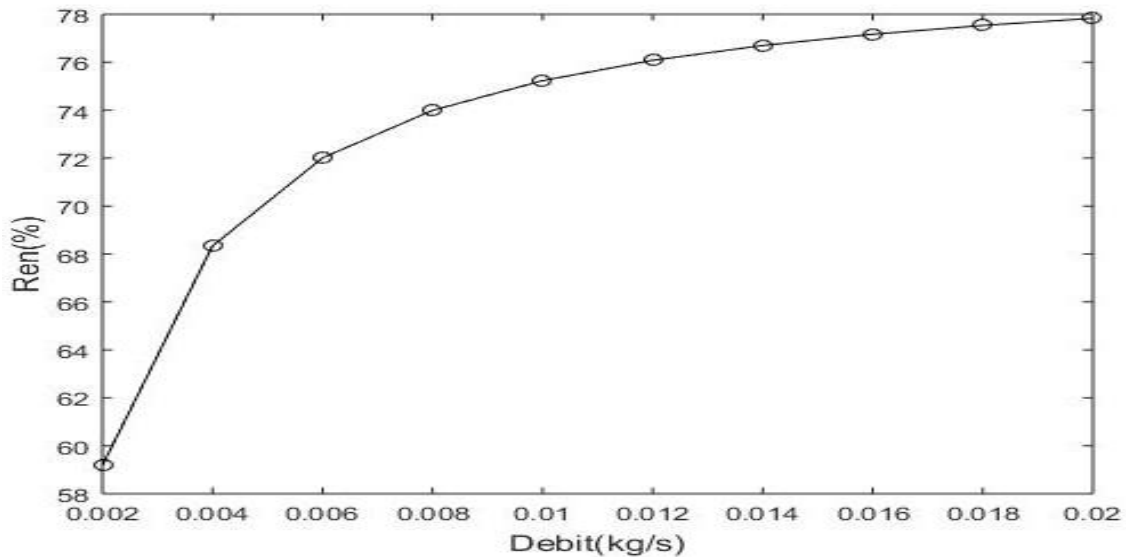


Fig. (4-c) : rendement en fonction du débit

IV-6-2 : performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 2 :

Dans la deuxième simulation nous avons introduit les propriétés thermiques du polystyrène comme cœur et nous avons changé à chaque fois les peaux. Il s'avère à travers les résultats du code de calcul que les valeurs de la température de sortie du capteur, l'énergie utile récupérée ainsi que le rendement thermique en fonction du débit sont meilleur qu'un capteur utilisant la pétiole comme cœur (Fig. 5-8).

Sandwich 1 : Contre-plaqué- Polystyrène- Contre-plaqué

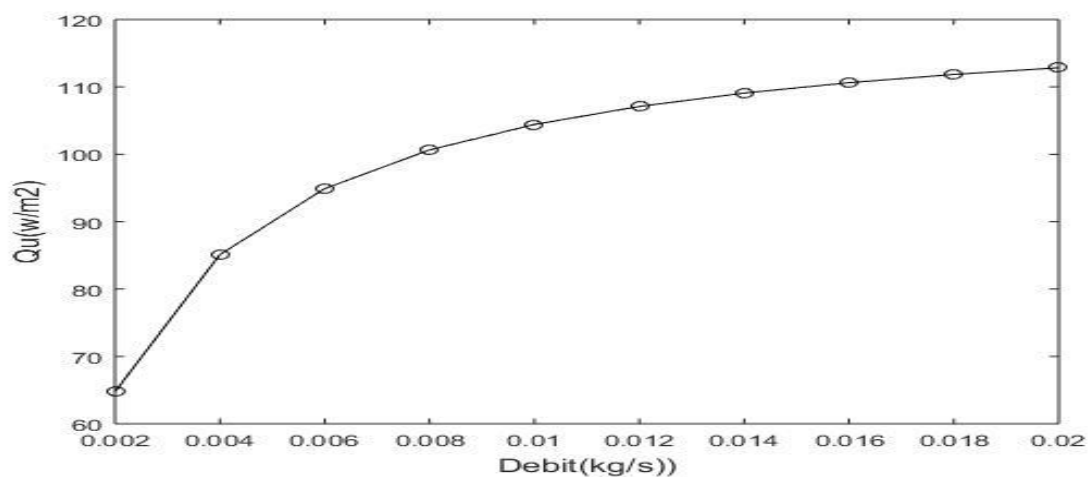


Fig. (5-a) : énergie utile en fonction du débit

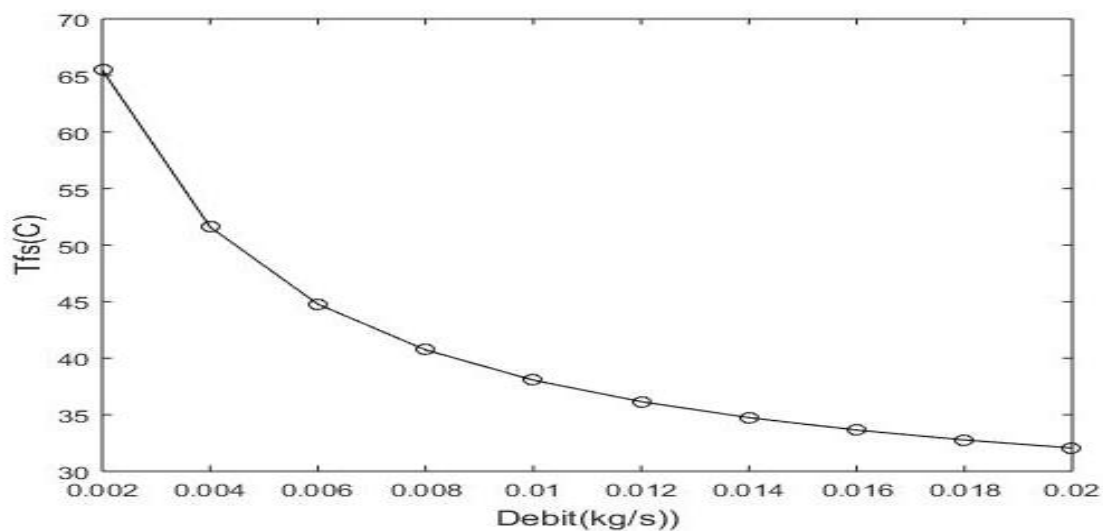


Fig. (5-b) : température sortie en fonction du débit

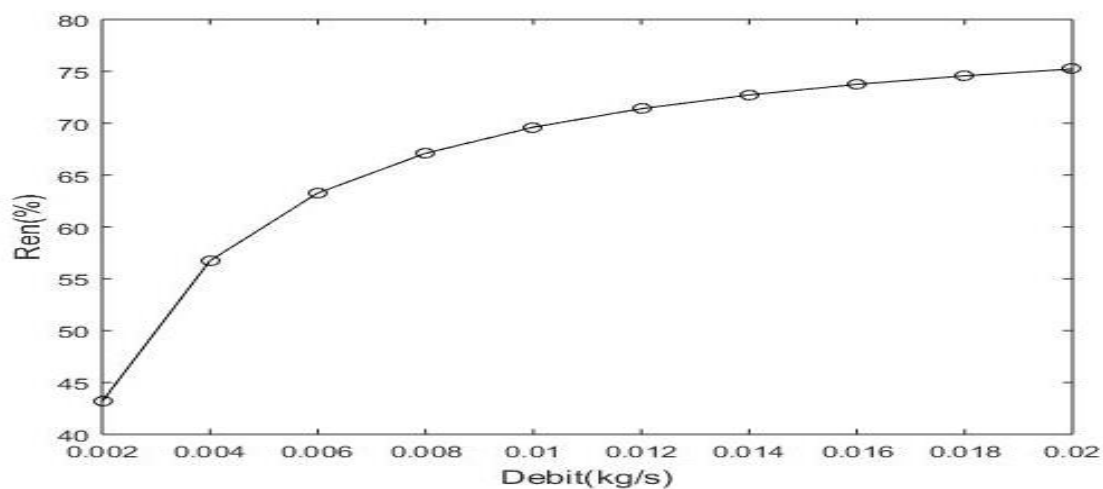


Fig.(5-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 2 : liège - Polystyrène –liège

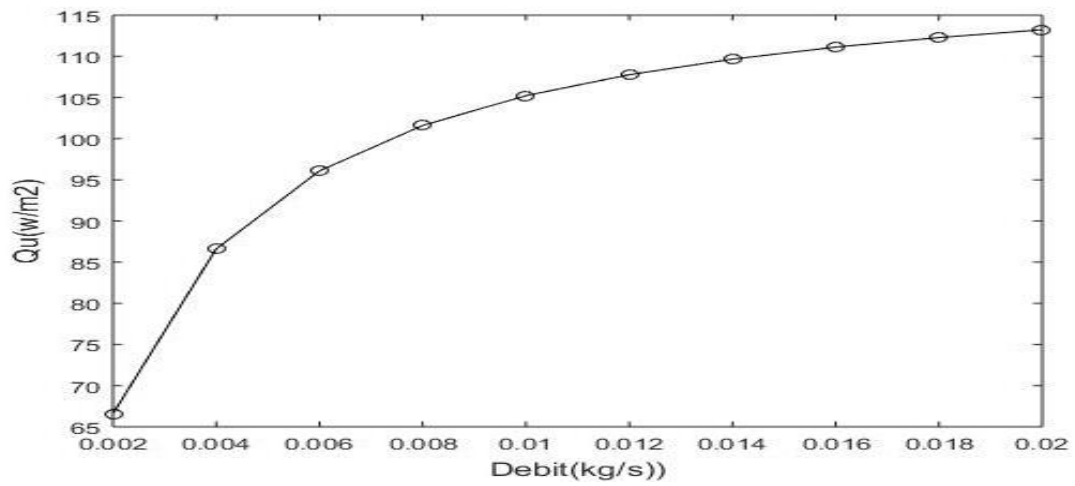


Fig. (6-a) : énergie utile en fonction du débit

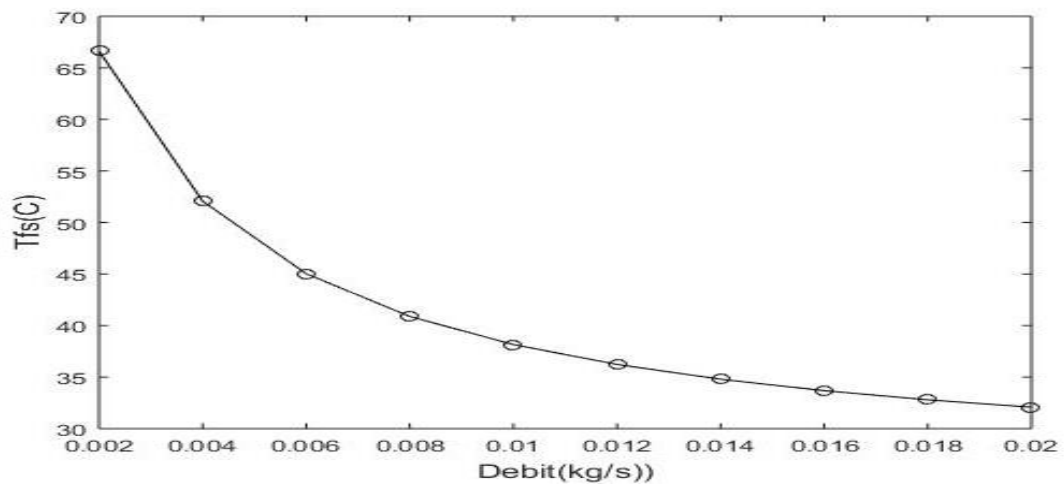


Fig. (6-b) : température sortie en fonction du débit

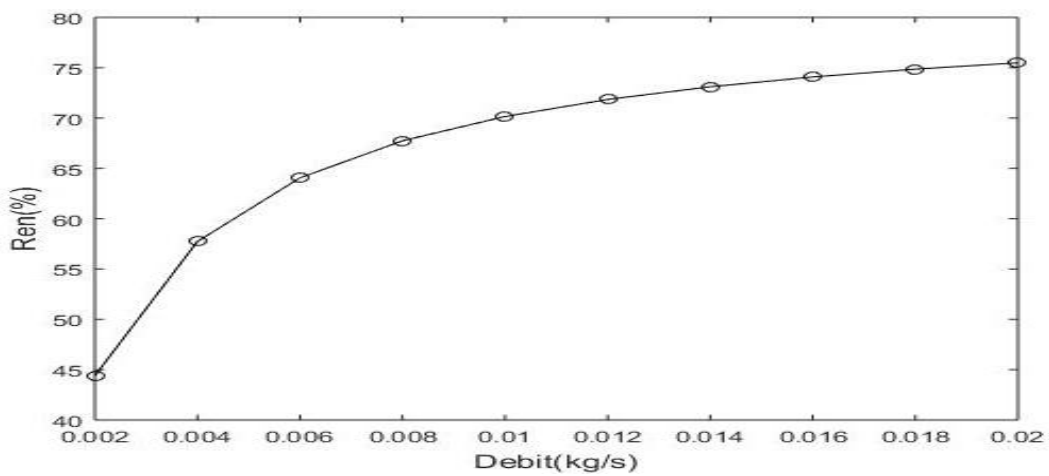


Fig.(6-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 3 : fibre de verre - Polystyrène –fibre de verre

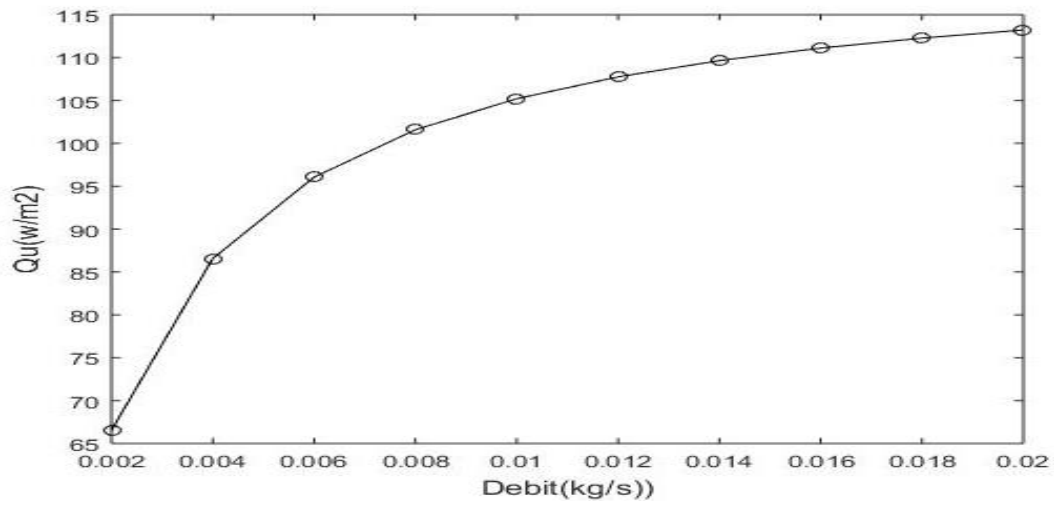


Fig. (7-a) : énergie utile en fonction du débit

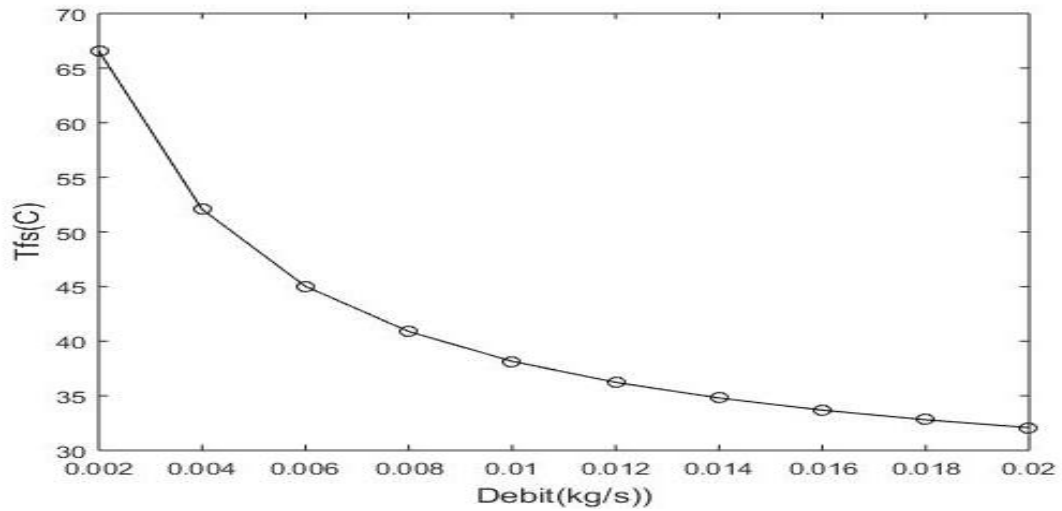


Fig. (7-b) : température sortie en fonction du débit

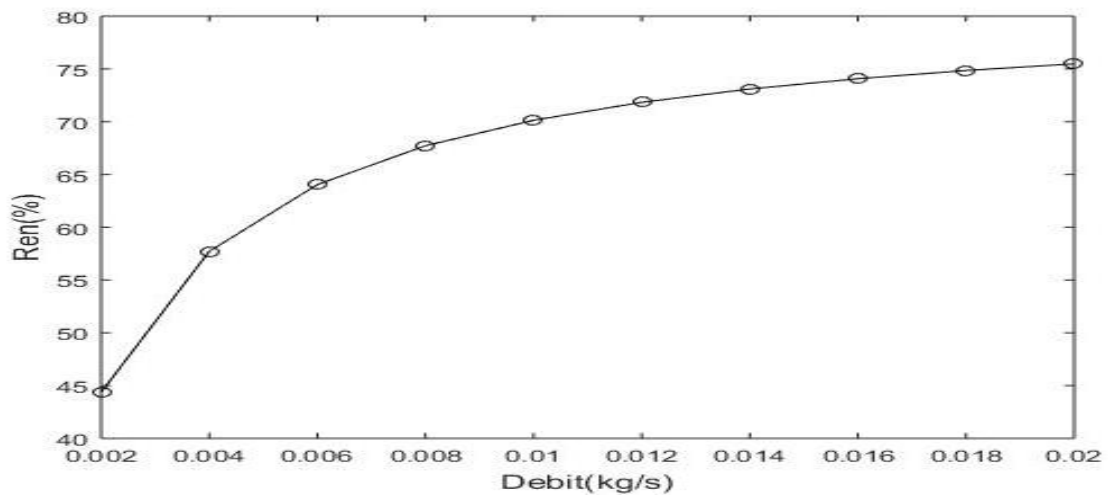


Fig. (7-c) : Rendement en fonction du débit

Sandwich 4 : papier recycle - Polystyrène – papier recyclé

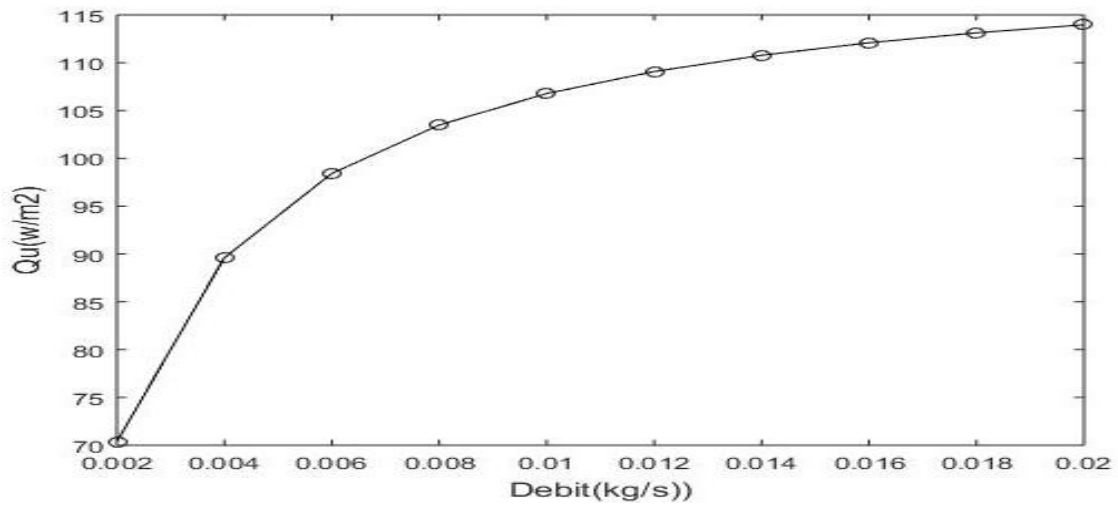


Fig. (8-a) : Energie utile en fonction du débit

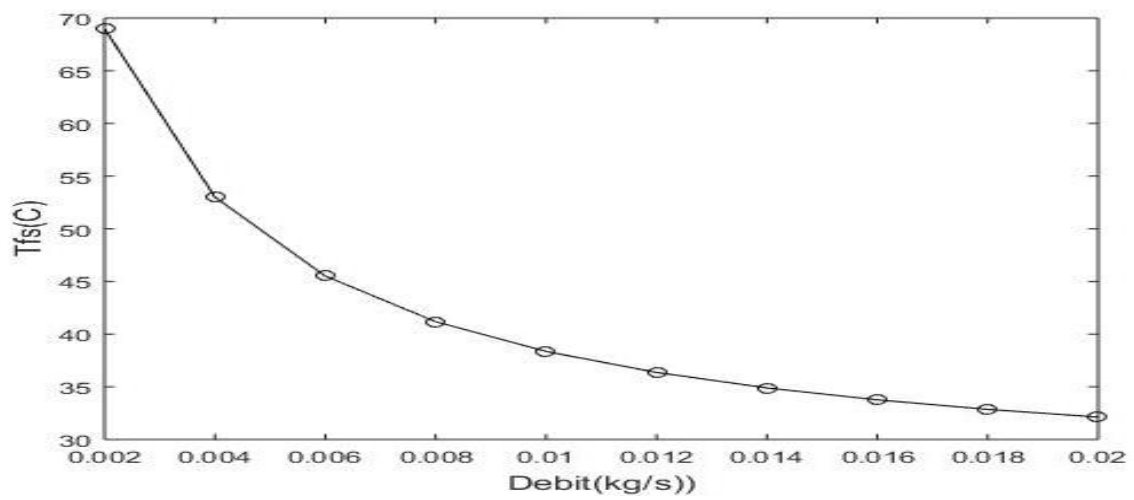


Fig. (8-b) : Température sortie en fonction du débit

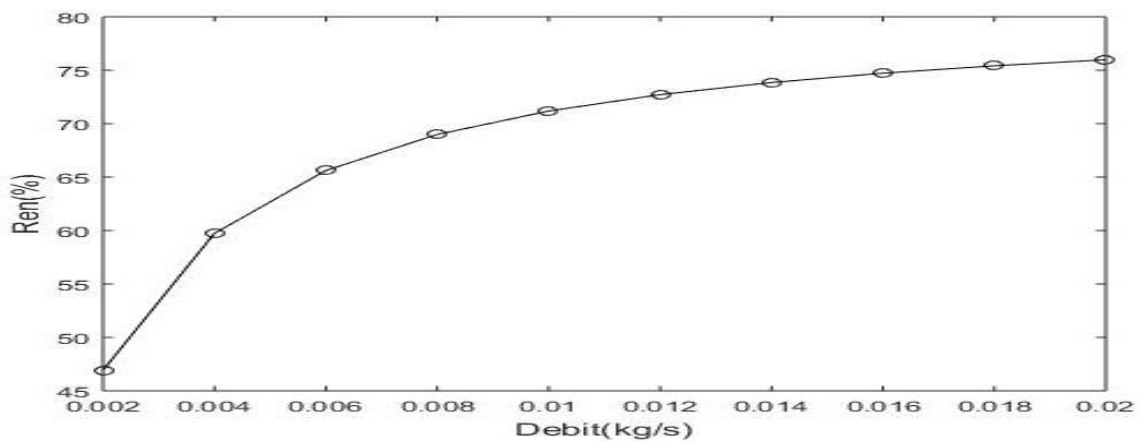


Fig. (8-c) : Rendement en fonction du débit

IV-6-3. Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 3 :

Dans la troisième simulation nous avons introduit les propriétés thermiques de la fibre de verre comme cœur et nous avons changé à chaque fois les peaux. Il est clair à travers les résultats du code de calcul que les valeurs de la température de sortie du capteur, l'énergie utile récupérée ainsi que le rendement thermique du sandwich 4 du groupe 2 sont meilleurs que ceux du groupe 3 (Fig. 9-12).

Sandwich 1 : Contre-plaqué-fibre de verre- Contre-plaqué

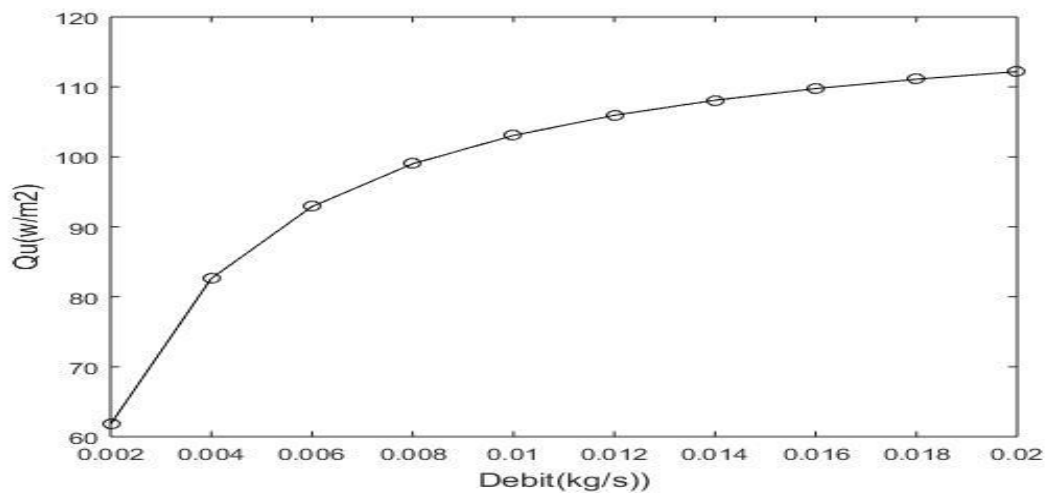


Fig. (9-a) : Energie utile en fonction du débit

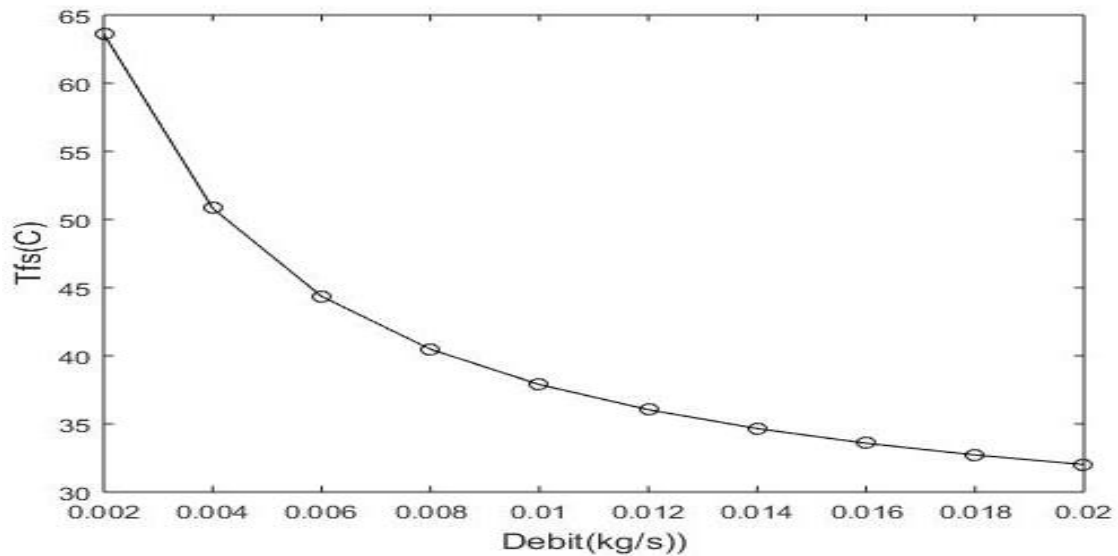


Fig. (9-b) : Température sortie en fonction du débit

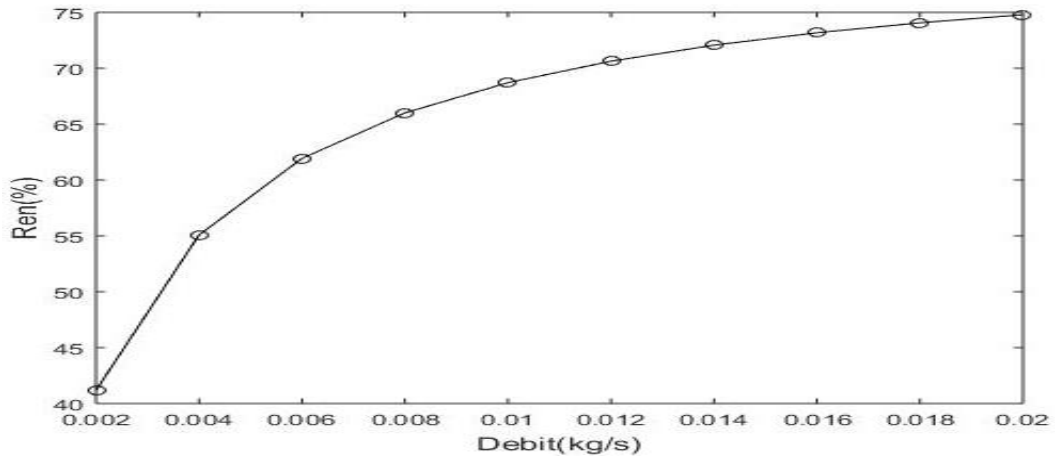


Fig. (9-c) : Rendement en fonction du débit

Sandwich 2 : liège -fibre de verre –liège

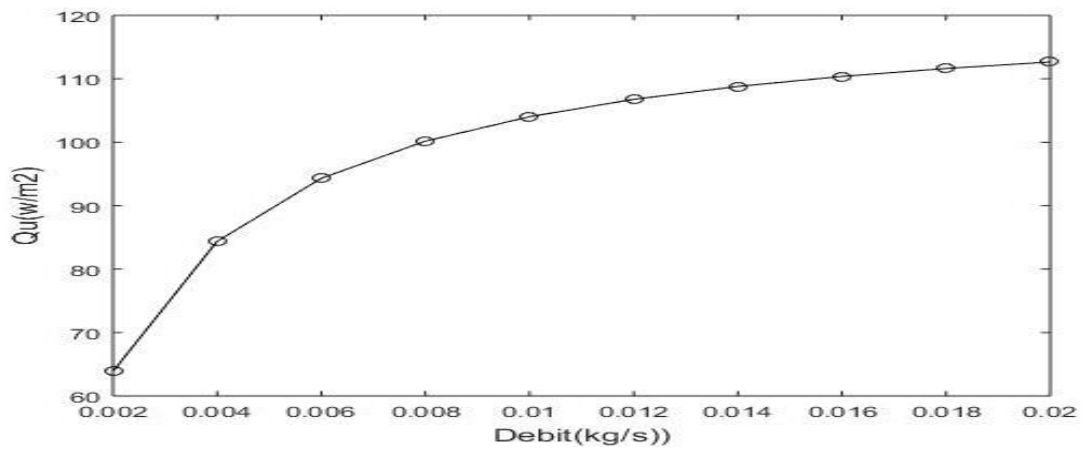


Fig. (10-a) : Energie utile en fonction du débit

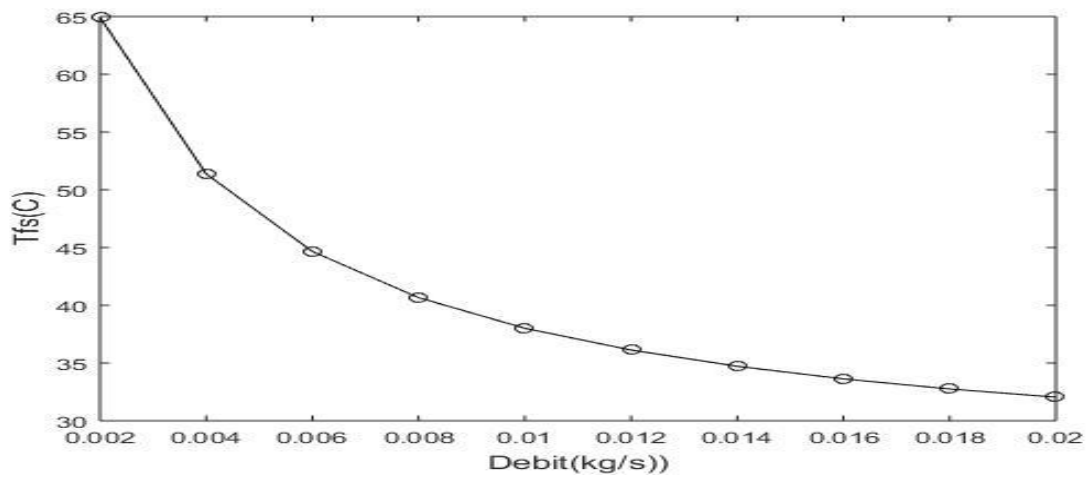


Fig. (10-b) : Temperature de sortie en fonction du débit

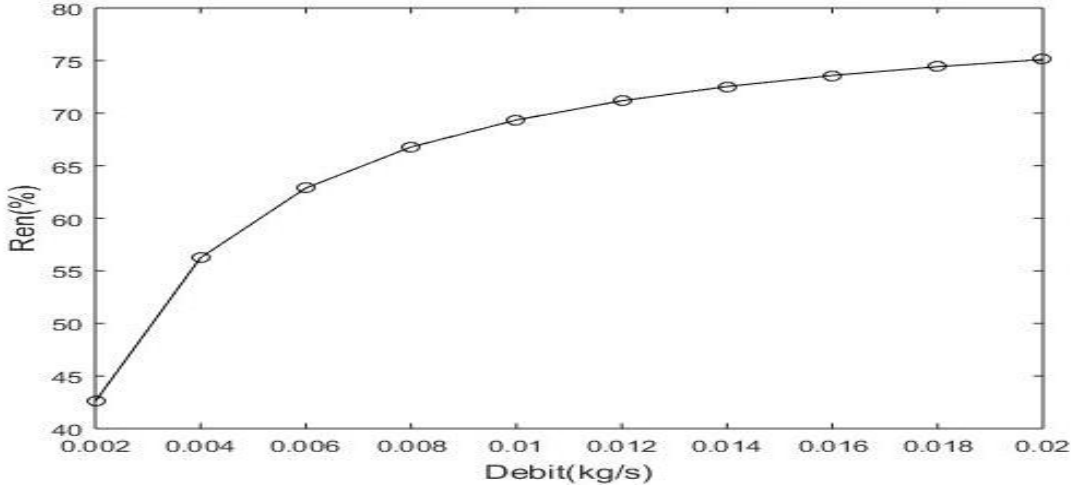


Fig. (10-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 3 : papier recycle -fibre de verre– papier recyclé

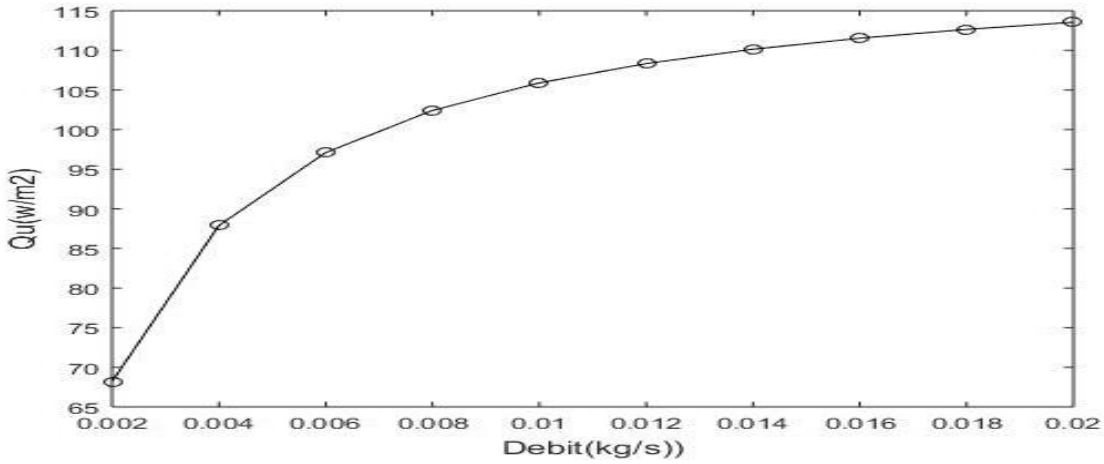


Fig. (11-a) : rendement en fonction du débit

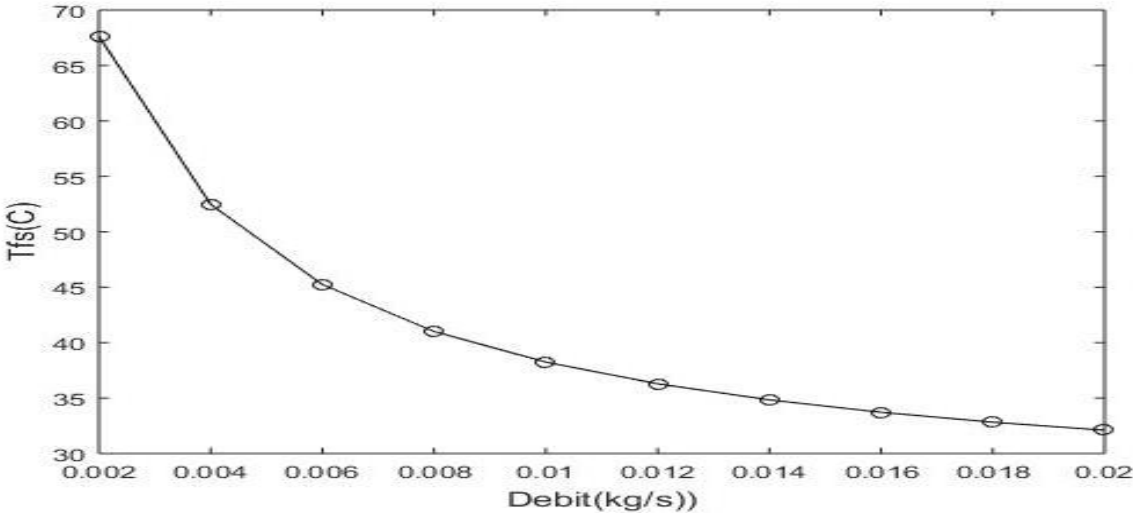


Fig. (11-b) : température sortie en fonction du débit

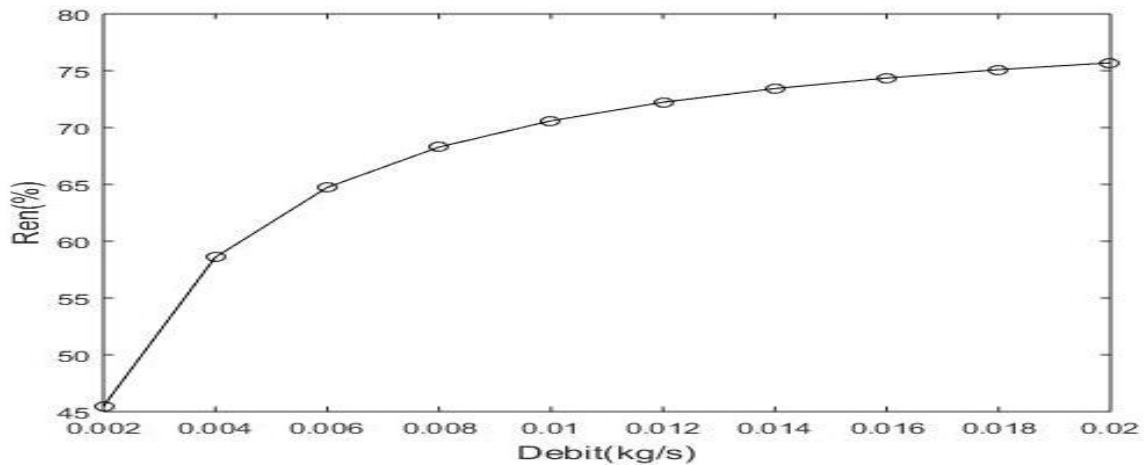


Fig. (11-c) : rendement en fonction du débit

IV-6-4. Performances thermiques d'un CSP utilisant les matériaux du groupe 4 :

Dans la quatrième simulation nous avons introduit les propriétés thermiques du papier recyclé comme cœur et nous avons changé à chaque fois les peaux. Il s'avère à travers les résultats que les valeurs de la température de sortie du capteur, l'énergie utile récupérée ainsi que le rendement thermique sont meilleur sen utilisant cette combinaison (Fig. 5-7).

Sandwich 1 : Contre-plaque-papier recyclé - Contre-plaqué

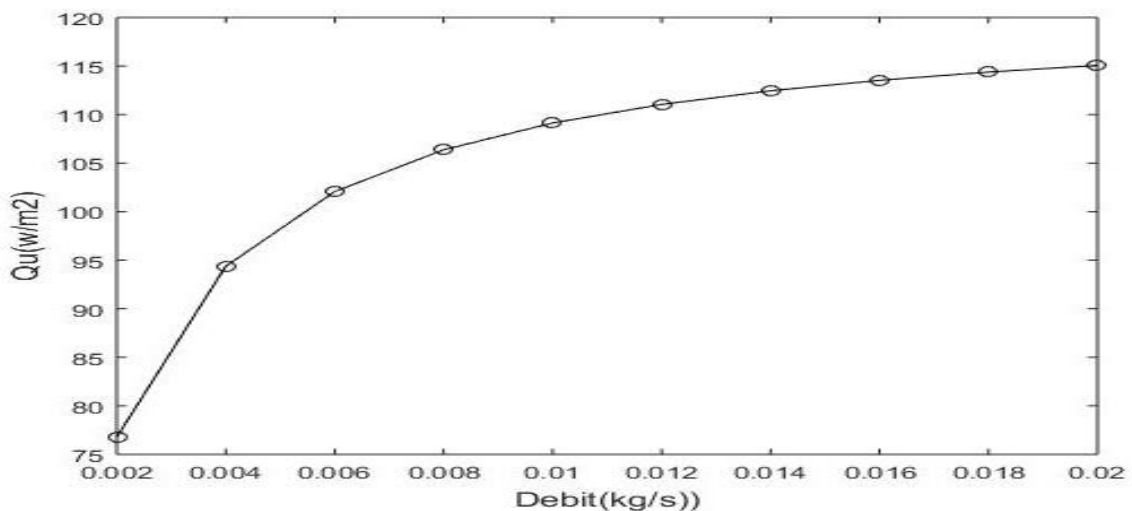


Fig. (12-a) : Energie utile en fonction du débit

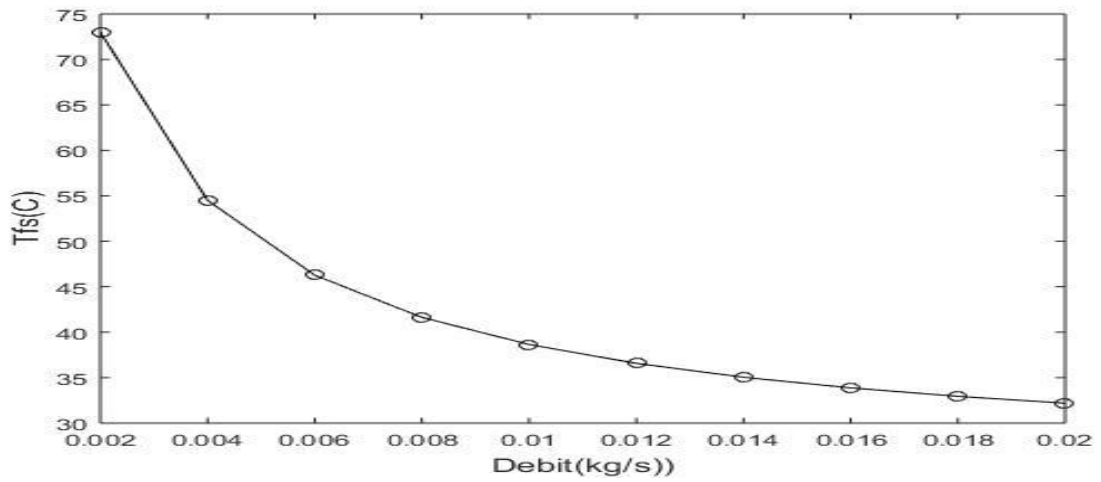


Fig. (12-b) : Température de sortie en fonction du débit

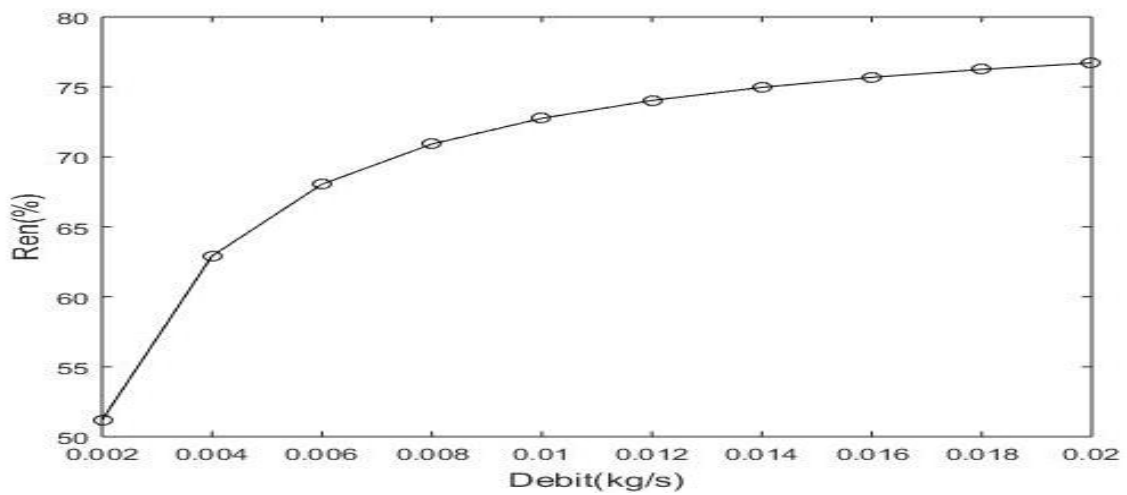


Fig. (12-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 2 : liège -papier recycle –liège

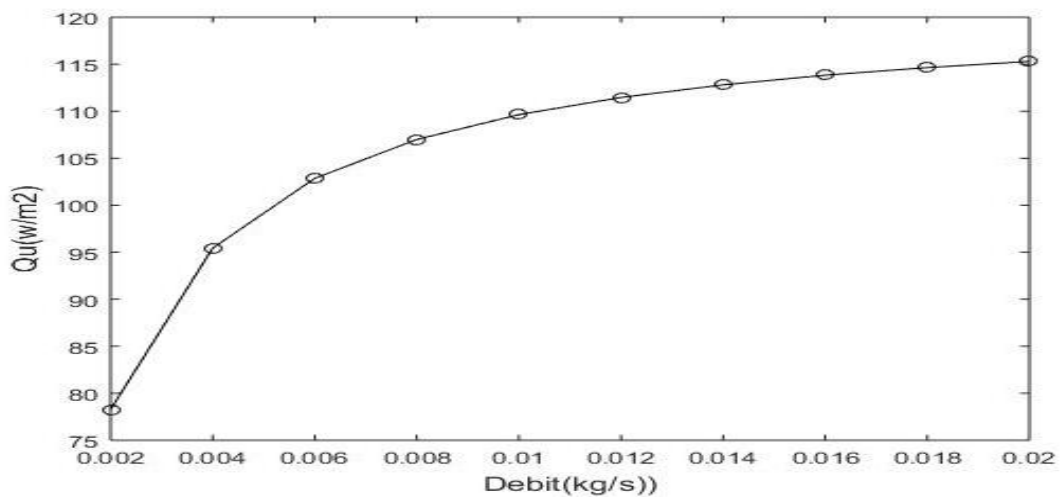


Fig. (13-a) : Energie utile en fonction du débit

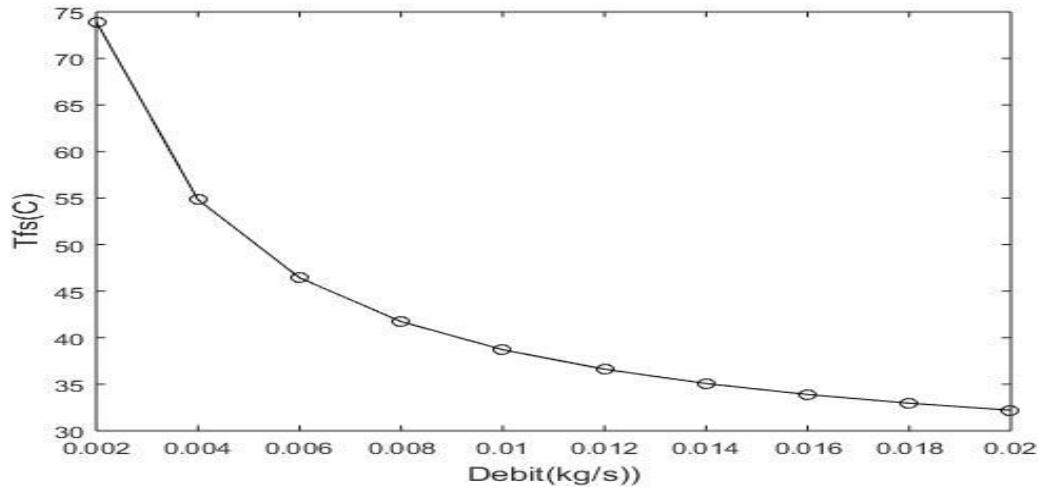


Fig. (13-b) : Température de sortie en fonction du débit

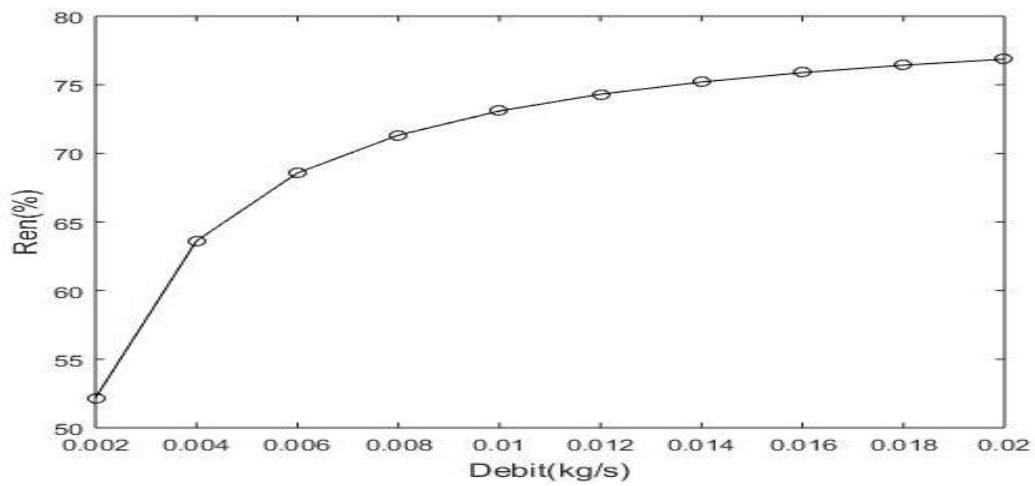


Fig. (13-c) : rendement en fonction du débit

Sandwich 3 : fibre de verre -papier recycle – fibre de verre

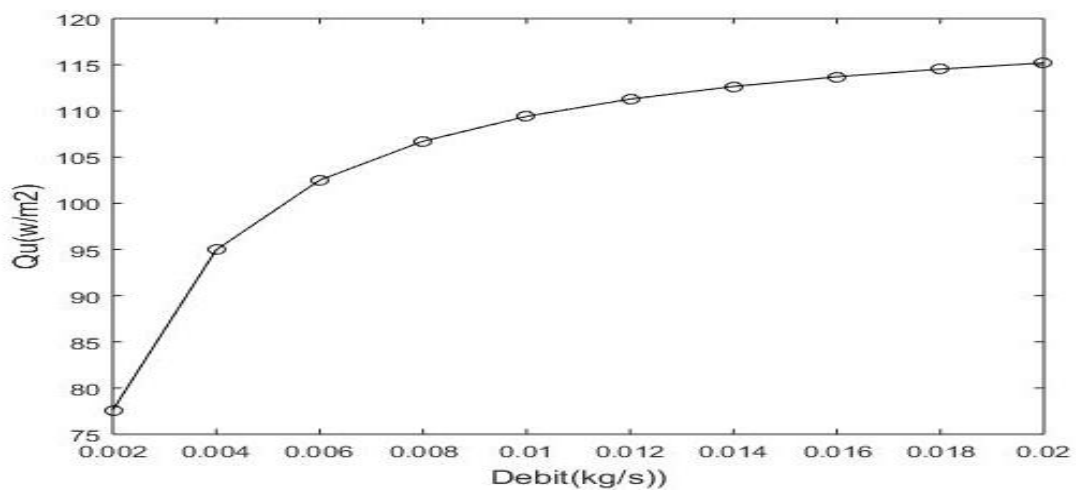


Fig. (14-a) : Energie utile en fonction du débit

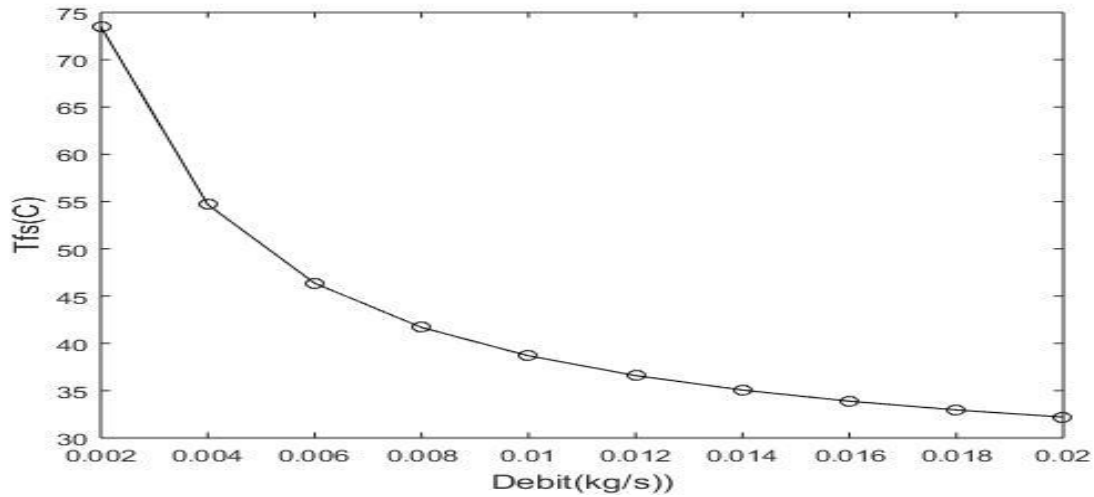


Fig. (14-b) : Température sortie en fonction du débit

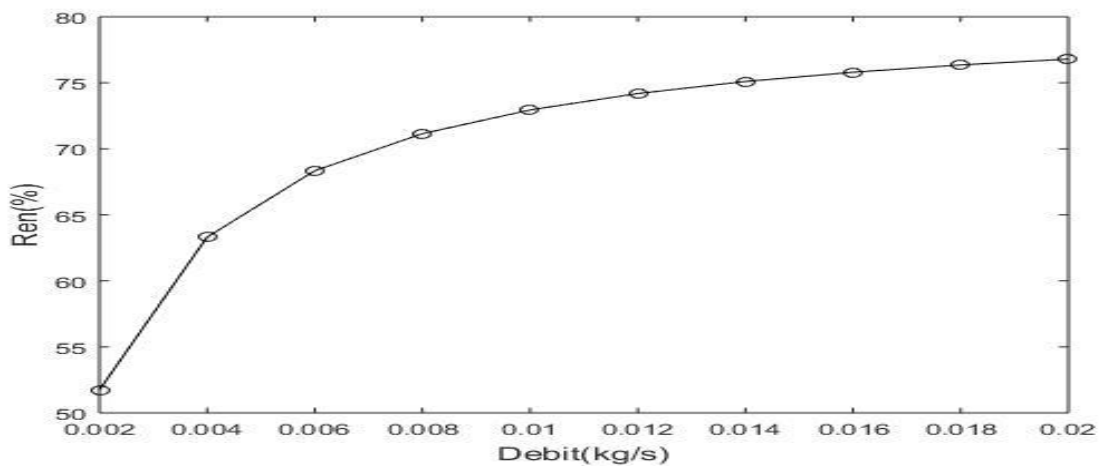


Fig. (14-c) : Rendement en fonction du débit

IV.7 Conclusion :

Une étude numérique a été menée dans ce chapitre, afin de déterminer les performances thermiques d'un capteur solaire plan à air utilisant différentes combinaisons de sandwichs avec des matériaux composites comme isolants de la partie arrière du CSP.

À partir de la comparaison entre les résultats de la résistance thermique des différentes combinaisons (peaux /Cœur) des sandwichs composites, nous avons constaté que les combinaisons du 4^{ème} groupe présentent les meilleures performances thermiques comme matériaux d'isolation.

Les sandwichs du 4^{ème} groupe ont montré une performance thermique distinguée avec une résistance thermique relativement élevée, ce qui a donné un meilleur rendement au sein de l'écoulement ($0,01 \leq \text{débit}$) et a également donné des températures de sortie importantes de l'ordre de 80°C pour un débit $>0,002 \text{ Kg/s}$.

En ce qui concerne l'utilisation des déchets du palmier dattier, les performances thermiques du capteur muni d'une isolation thermique comportant le pétiole comme un des constituants ne sont pas les meilleures performances, mais il donne une température de sortie largement suffisante pour différentes applications tels que le séchage et le chauffage.

IV.8 Conclusion général :

Notre travail est une contribution à l'étude numérique des performances des capteurs solaires plans à air utilisant différents matériaux composites comme isolation arrière. Parmi ces matériaux, nous avons utilisé les propriétés du pétiole du palmier dattier, dont les palmiers dattier produisent chaque année de grandes quantités de déchets inexploités, et au lieu de s'en débarrasser, ils peuvent jouer un rôle dans l'économie nationale tel que l'industrie du bois, la biomasse, le composte et l'isolation thermique

L'objectif était de réduire la perte d'énergie thermique du capteur solaire en améliorant les performances d'une grande partie du capteur solaire qui est l'isolation arrière.

L'étude menée sur plusieurs isolants sous forme de sandwichs, a conduit à une bonne performance thermique en tant qu'isolant thermique qui peut être adoptée en fonction des résultats de sa résistance thermique.

À partir de la comparaison entre les résultats de la résistance thermique des différentes combinaisons (peaux /Cœur) des sandwichs composites, nous avons constaté que les combinaisons du 4^{ème} groupe composé du papier recyclé comme cœur, présentent les meilleures performances thermiques comme matériaux d'isolation, par conséquent les meilleures performances du capteur solaire.

Les sandwichs du 4^{ème} groupe ont montré une performance thermique distinguée avec une résistance thermique relativement élevée, ce qui a donné un meilleur rendement au sein de l'écoulement ($0,01 \leq \text{débit}$) et a également donné des températures de sortie importantes de l'ordre de 80°C pour un débit $>0,002 \text{ Kg/s}$.

Chapitre IV : Résultats et interprétation

En ce qui concerne l'utilisation des déchets du palmier dattier, les performances thermiques du capteur muni d'une isolation thermique comportant le pétiole comme un des constituants ne sont pas les meilleures performances. Malgré que le panneau composé du pétiole comme cœur ne présente pas la meilleure résistivité thermique mais les performances du capteur utilisant ce matériau sont très suffisantes pour différentes applications telles que le chauffage et le séchage des produits agro-alimentaires.